

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Под редакцией И.П. Копылова

В ДВУХ КНИГАХ
КНИГА 1

2-е издание, переработанное
и дополненное

Рекомендовано Комитетом по высшей школе
Министерства науки, высшей школы и технической
политики Российской Федерации в качестве учебника
для студентов вузов, обучающихся по специальности
"Электромеханика"



МОСКВА. ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1993

ББК 31.261

П79

УДК 621.313.001.2/3 (075.8)

Рецензент кафедра электрических машин ЛПИ им. М.И. Калинина
(С.-Петербургский Государственный технический университет)

Авторы: И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев

Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов. —
П 79 В 2-х кн.: кн. 1/ И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин,
Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. — 2-е изд., перераб. и
доп. — М.: Энергоатомиздат, 1993. — 464 с. : ил.

ISBN 5-283-00724-3

Рассмотрены электромагнитные, тепловые, вентиляционные и механические расчеты асинхронных, синхронных машин и машин постоянного тока. Во втором издании, выходящем в двух книгах, приведены примеры расчетов электрических машин новых серий. Даны необходимые справочные материалы для выполнения курсовых и дипломных проектов. Первое издание вышло в 1980 г.

Для студентов электротехнических и энергетических специальностей. Может быть полезна инженерам, специализирующимся в области проектирования электрических машин.

2202070100-033
П ————— 64-91
051 (01)-93

ББК 31.261

ISBN 5-283-00724-3 (кн.1)

ISBN 5-283-00669-7

© Издательство "Энергия", 1980

© Авторы, 1993, с изменениями

ПРЕДИСЛОВИЕ

Значительное увеличение производства электрических машин в последние десятилетия ставит перед инженерами-электромеханиками с особой остротой проблемы экономии материалов и электроэнергии, снижения трудоемкости и повышения надежности электрических машин. Решение этих проблем во многом зависит от умения проектировать электрические машины с высокими технико-экономическими показателями.

При работе над учебником авторы использовали новейшие достижения электротехнической промышленности по единым сериям АИ, 4П и новым сериям синхронных двигателей. В книге нет материалов по специальным электрическим машинам, турбо- и гидрогенераторам. Хотя учебник, в основном, предназначен для студентов, он может быть полезен инженерам-электромеханикам в их практической работе.

Первое издание книги вышло в свет в 1980 г. Второе издание, переработанное и дополненное примерами расчета новых серий электрических машин, состоит из двух книг. Книги следует рассматривать как единое целое, так как они связаны общей программой курса по электрическим машинам. Общие материалы располагаются как в первой, так и во второй книге (например, общие вопросы проектирования электрических машин, приложения и т.п.).

Учебник написан сотрудниками кафедры электромеханики МЭИ.

Работа между авторами была распределена следующим образом: проф. И.П. Копыловым написаны введение и гл. 1, 2 и 12, доц. Б.К. Клоковым – гл. 3–6, 8, проф. В.П. Морозкиным – гл. 7 и 10, проф. Б.Ф. Токаревым – гл. 9 и 11.

Авторы благодарят коллектив кафедры электрических машин С.-Петербургского Государственного технического университета и доцента, канд. техн. наук М.И. Токова за ценные замечания, которые учтены при работе над рукописью.

Авторы с благодарностью примут все замечания читателей и просят направлять их по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Авторы

Данный учебник должен научить рассчитывать электрическую машину, применяя традиционные средства вычислительной техники. В книге по каждому типу машин имеются примеры расчета, которые могут быть выполнены с применением мини-ЭВМ.

Учебник не может содержать все данные, необходимые для расчета и конструирования электрической машины, поэтому предполагается, что читатель при выполнении проекта будет пользоваться справочниками, электротехническими журналами, каталогами и атласами чертежей.

ВВЕДЕНИЕ

Электротехническая промышленность – ведущая отрасль народного хозяйства. Продукция электротехнической промышленности используется почти во всех промышленных установках, поэтому качество электротехнических изделий во многом определяет технический уровень продукции других отраслей.

Электрические машины в общем объеме производства электротехнической промышленности занимают основное место, поэтому технико-экономические показатели и эксплуатационные свойства электрических машин имеют важное значение для экономики нашей страны.

Проектирование электрических машин – это искусство, соединяющее знание процессов электромеханического преобразования энергии с опытом, накопленным поколениями инженеров-электро механиков, умением применять вычислительную технику и талантом инженера, создающего новую или улучшающего уже выпускаемую машину.

При создании электрической машины рассчитываются размеры статора и ротора, выбираются типы обмоток, обмоточные провода, изоляция, материалы активных и конструктивных частей машины. Отдельные части машины должны быть так сконструированы и рассчитаны, чтобы при изготовлении машины трудоемкость и расход материалов были наименьшими, а при эксплуатации машина обладала высокой надежностью и наилучшими энергетическими показателями, при этом электрическая машина должна соответствовать условиям применения ее в электроприводе.

При проектировании необходимо учитывать соответствие технико-экономических показателей машин современному мировому уровню при соблюдении требований государственных и отраслевых стандартов. Приходится также учитывать назначение и условия эксплуатации, стоимость активных и конструктивных материалов, КПД, технологию производства, надежность в работе и патентную чистоту. Расчет и конструирование электрических машин неотделимы от технологии их изготовления. Поэтому при проектировании необходимо учитывать возможности электротехнических заводов, стремиться к максимальному снижению трудоемкости изготовления электрических машин.

Увеличение производительности труда при производстве электрических машин возможно только при внедрении комплексной автоматизации и механизации процессов изготовления машин. В некоторых случаях оказывается целесообразным для повышения надежности в работе и возможности автоматизации процессов изготовления машин пойти на снижение коэффициента заполнения пазов и некоторое увеличение трудоемкости.

Электрические машины единых серий выпускаются в огромных количествах. Только асинхронных двигателей единых серий в ближайшие годы намечено выпускать около 10 млн. в год. Серии электрических машин сменяются в течение 7–12 лет. Проектирование новых серий — ответственная, выходящая за рамки одной отрасли проблема, осуществляемая с учетом мировых достижений ведущих электротехнических фирм. Это накладывает особые требования на проектирование базовых машин серий и их модификаций. При проектировании необходимо учитывать возможные изменения стоимости материалов и электроэнергии, спрос на международном рынке, затраты на технологическое оборудование и другие факторы.

Критерий оптимизации определяется, как правило, минимумом суммарных затрат, т.е. минимумом стоимости материалов, затрат на изготовление и эксплуатацию. Стоимость эксплуатации зависит от КПД, коэффициента мощности, качества машины, ремонтоспособности и ряда других факторов.

Выбрать оптимальный вариант можно, сопоставив многие варианты расчета. Поэтому без вычислительных машин не обходится ни один серьезный расчет электрических машин. Вначале вычислительные машины применялись для расчетов частных задач, расчета отдельных этапов проекта: магнитной цепи, потерь, рабочих характеристик, теплового расчета, вибраций и т.п. В последние годы ЭВМ применяются для выполнения полного оптимизационного расчета электрической машины, и ведутся работы по созданию системы автоматизированного проектирования электрических машин, которая должна не только выполнять расчет машины, но и выдавать рабочие чертежи. Предполагается, что в будущем автоматизированные системы проектирования будут выполнять работу от приема заказа на проектирование до испытания машины без ее изготовления — прогнозирования геометрии, надежности и характеристик.

Сопоставление программ расчетов, накопление банка данных, решение вопросов создания автоматизированной системы проектирования электрических машин — одни из трудных и важных задач электротехнической науки. Прежде чем заниматься этими вопросами, необходимо научиться проектировать машину. Для этого надо уметь проводить электромагнитный, тепловой, механический и экономический расчеты машины.

Глава первая

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1.1. ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Электрические машины применяются во всех отраслях промышленности, в сельском хозяйстве и в быту. Они выпускаются большими сериями и в индивидуальном исполнении. Во многих случаях электрические машины определяют технический уровень изделий, в которых они используются в качестве генераторов и двигателей. Проектирование электрических машин требует глубоких знаний и высокого профессионального мастерства.

Первые электрические машины получили применение в промышленности более ста лет назад. Тогда же появились и первые рекомендации по их расчету. В конце прошлого века в Европе и Америке возникли крупные электротехнические фирмы "Сименс", "Вестингауз" и другие, на которых сложились крупные конструкторские и расчетные отделы. В это же время начинают издаваться первые электротехнические журналы.

В России электротехнические заводы появились в начале века. Это "Электросила" в С.-Петербурге, "Динамо" в Москве и заводы в Харькове и Таллинне. В годы первых пятилеток Москва, Ленинград, Харьков превратились в крупные производственные центры электропромышленности. После Великой Отечественной войны электротехническая промышленность развивалась бурными темпами, и в настоящее время крупные центры электромашиностроения имеются в десятках городов СНГ. Около пятидесяти кафедр высших учебных заведений выпускают специалистов по электрическим машинам.

Первые капитальные работы по расчетам и проектированию электрических машин появились в конце десятых — начале двадцатых годов. Это были книги Э. Арнольда, М. Видмара, А. Ла-Кура, Р. Рихтера, К.И. Шенфера, В.С. Кулебакина и др.

Первыми отечественными трудами по проектированию были книги А.Я. Бергера, П.П. Кошляева, В.А. Пантелеева и Ф.И. Холуянова. Большой вклад в проектирование электрических машин внесли работы ученых А.Е. Алексеева, Б.П. Апарова, А.И. Вольдека, В.Т. Касьянова, М.П. Костенко, Б.И. Кузнецова, Р.А. Лютера, Г.Н. Петрова, И.М. Постникова, П.С. Сергеева, Т.Г. Сорокера, В.А. Трапезникова и др.

Проектирование электрической машины — сложная многовариантная задача. При ее решении приходится учитывать большое количество факторов. Естественным стремлением все это проектирует машину, является получение, по возможности наименее быстрым путем, более близкого к заданию расчетного варианта. Поэтому методики, подход к расчету и проектированию электрических машин на всех этапах развития включали в себя все новейшие достижения в теории и практике электромашиностроения.

Большинство расчетных методик исходит из так называемой "машинной постоянной", определяемой из допустимых электромагнитных нагрузок.

Машинная постоянная Арнольда

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta \Omega}{P'} = \frac{2}{\pi a_\delta k_B k_{об} A B_\delta}, \quad (1.1)$$

где D — диаметр якоря машины постоянного тока или внутренний диаметр статора, м; l_δ — расчетная длина магнитопровода, м; Ω — угловая скорость, рад/с; P' — расчетная мощность, В · А; A — линейная нагрузка, А/м; B_δ — индукция в воздушном зазоре, Тл; a_δ — коэффициент полюсного перекрытия; k_B — коэффициент формы кривой индукции, учитывающий изменение напряжения на выводах машины при холостом ходе и нагрузке; $k_{об}$ — обмоточный коэффициент.

Определив $C_A = f(P')$ для различных типов электрических машин, можно получить базу для их расчетов. Машинная постоянная не является постоянной и зависит от электромагнитных нагрузок, напряжения, типа изоляции, системы охлаждения, стоимости материалов, надежности работы машины, суммы капитальных и эксплуатационных затрат и других факторов.

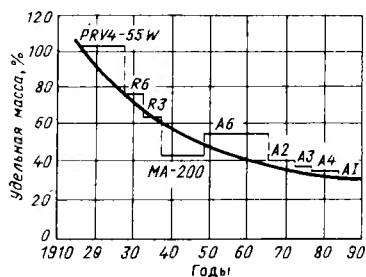
Эссон в 20-х годах предложил при проектировании применять коэффициент использования машины — момент на единицу объема, по существу, величину, обратную постоянной Арнольда.

Машинная постоянная Рихтера есть момент, отнесенный к единице поверхности якоря. В машинной постоянной Шенфера вместо внутреннего диаметра статора используется внешний диаметр.

В 1926 г. В.С. Кулебакин при выборе главных размеров синхронных машин учитывал токи короткого замыкания. В 1934 г. Б.П. Апаров для синхронных машин предложил при выборе главных размеров исходить из необходимой кратности пускового и максимального моментов.

Г.Н. Петров вводит понятия единичной машины и касательной силы, действующей на единицу поверхности ротора. Касательная сила зависит от мощности машины, но даже у самых крупных машин не превосходит 0,03–0,04 МПа [14, 21].

Рис. 1.1. Снижение массы асинхронных двигателей



Развитие теории электрических машин, широкое применение вычислительных машин изменяют подход к проектированию электрических машин. Наиболее общим показателем для различных типов электрических машин является удельная мощность энергии магнитного поля, сконцентрированная в воздушном зазоре машины [14, 15].

Масса на единицу мощности является одним из основных факторов, характеризующих технический уровень электрических машин. По сравнению с 1913 г. масса асинхронных двигателей современных серий снижена более чем в 3 раза (рис. 1.1). Наиболее значительное снижение массы было достигнуто в 1920–1950 гг. Предполагается, что в 1990–2000 гг. сокращение массы может составить не более 4–5%. В дальнейшем будет еще труднее обеспечить снижение массы при практически неизменном уровне энергетических показателей электрической машины. Даже небольшой процент сокращения расхода активных материалов потребует серьезных работ по усовершенствованию конструкции, технических свойств изоляционных и магнитных материалов. Снижение металлоемкости необходимо, так как выпуск асинхронных машин единой серии постоянно увеличивается.

Удельный расход материалов в турбогенераторах с 1952 г. снизился более чем в 3 раза. Турбогенератор на 150 тыс. кВт с водородным охлаждением имел массу 350 т. Турбогенератор ТВВ-1200-2 имеет массу на единицу мощности, равную 0,457 кг/(кВ · А).

Как следует из (1.1), размеры машины зависят от индукции в воздушном зазоре B_δ и линейной нагрузки A .

При рассмотрении электрической машины как объекта разработки необходимо учитывать объем и длительность проектных, расчетных и технологических работ. Предпроизводственные работы включают изготовление рабочих чертежей, технологической оснастки и изготовление опытных образцов.

Предпроизводственный этап требует достаточно много времени, и в нем участвуют большие коллективы конструкторов и технологов. Качество разработки проекта определяет судьбу электрической машины в производстве и эксплуатации.

Электрическая машина как объект производства должна иметь минимальную трудоемкость и минимальные капитальные вложения в произ-

водство. Для этого она должна иметь технологичную конструкцию, максимально использовать существующее технологическое оборудование и оснастку.

С каждым годом растут механизация и автоматизация электромашиностроительных заводов. Широко используются станки для механизированной укладки обмотки статоров и якорей электрических машин, применяются высокопроизводительные штампы и прессы. Для сборочных работ используются роботы, для изготовления валов и станин применяются автоматизированные линии. В ближайшие годы на заводах будут широко использоваться гибкие автоматизированные комплексы. При проектировании машины необходимо учитывать особенности производства, на котором предполагается изготовление машины.

Важнейшим требованием является минимальная материалоемкость электрических машин. Экономия электротехнической стали, меди, алюминия, изоляции и конструкционных материалов является важнейшим требованием при создании новой электрической машины.

Экономия материалов связана с безотходной и малоотходной технологией. При штамповке листов стали статора и ротора в среднем 40% стали идет в отходы, а в некоторых случаях 60–70%. В машинах малой мощности за счет изменения конструкции и технологии изготовления магнитной системы можно значительно уменьшить отходы электротехнической стали.

Электрические машины с безотходной технологией изготовления имеют преимущества перед обычными машинами, если сохраняются и требования к машине как к объекту эксплуатации.

Как объект эксплуатации электрическая машина должна иметь высокие показатели (КПД и $\cos\phi$). Электрические машины с минимальными потерями позволяют уменьшить вложение материалов в энергосистему. Высокие энергетические показатели электрической машины гарантируют снижение уровня текущих затрат на эксплуатацию и капитальные вложения потребителя.

Вновь разрабатываемые электрические машины должны соответствовать высшей категории качества. Они должны быть надежными и, как правило, иметь срок службы 8–10 лет.

Показатели экономической эффективности электрической машины могут быть установлены на основании анализа приведенных затрат, которые включают затраты на изготовление и эксплуатацию машины.

1.2. ПРОБЛЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектирование электрической машины сводится к многократному расчету зависимостей между основными показателями, заданных в виде системы формул, эмпирических коэффициентов, графических зависимостей, которые можно рассматривать как уравнения проектирования. Оптимальное проектирование электрических машин может пред-

ставляться как поиск оптимальных параметров путем решения этой системы уравнений.

Выбор оптимальных параметров затрудняется сложностью алгоритма расчета электрической машины по формулам проектирования. При проектировании необходимо учитывать стоимость машины, надежность и технологичность конструкции. Эти показатели косвенно входят в формулы проектирования, что затрудняет оптимизацию. Оптимальные варианты электрической машины выбираются на основании широкого применения вычислительных машин, опыта и интуиции проектировщика.

Анализ приведенных затрат применительно к асинхронным двигателям единой серии до 10 кВт показал, что примерно 70% затрат составляют текущие расходы на их эксплуатацию. На долю капиталовложений приходится лишь 15–20% всех затрат. Следовательно, повышение эффективности новых электрических машин прежде всего связано со снижением эксплуатационных расходов. Первоочередное значение здесь имеют повышение надежности в работе машин и улучшение их энергетических показателей, при этом повышение КПД экономически более выгодно, чем повышение $\cos\phi$.

Повышение надежности и улучшение КПД должны достигаться без заметного увеличения затрат на изготовление электрической машины. Сокращение расходов на электротехническую сталь и обмоточные провода может дать существенное уменьшение себестоимости электрической машины.

Хотя основная заработная плата и составляет 5–8% себестоимости, снижение трудоемкости механических и обмоточно-изолировочных работ имеет важное значение. В связи с увеличением выпуска электрических машин и недостатком рабочей силы снижение трудоемкости настолько важно, что в серии 4А пошли на некоторое снижение энергетических показателей, увеличив размеры шлица пазов для возможности машинной намотки обмотки. Таким образом, проектирование электрических машин неотделимо от конструирования и технологии изготовления.

При оптимизации электрических машин важное значение имеет выбор критерия оптимизации.

Выбор критерия оптимизации зависит от назначения электрической машины и предъявляемых к ней требований. Для специальных машин целесообразно выбирать минимум массы или минимальные габариты. Для электрической машины общего назначения в качестве критерия оптимизации принимают минимум приведенных затрат. Этот критерий широко применяется у нас и за рубежом. Приведенные затраты на электрическую машину в процессе производства и эксплуатации являются обобщающим экономическим показателем, включающим основные экономические эквиваленты основных технических характеристик. Нельзя найти универсальный критерий оптимальности. Действительно,

минимальная масса машины обуславливает снижение энергетических показателей и ухудшение надежности. Наиболее очевидны противоречия между статическими и динамическими характеристиками. Для уменьшения времени разбега асинхронного двигателя надо увеличивать активное сопротивление обмотки ротора, что вызывает ухудшение энергетических показателей в установившемся режиме.

Выбор критерия оптимизации электрической машины, работающей в автономной энергетической системе, обычно отличается от выбора критерия оптимизации машин общего назначения. Машины автономных энергетических систем в большинстве случаев оптимизируются по минимуму массы, а в передвижных энергетических системах — по минимуму общей массы электрооборудования системы. Когда электрическая машина работает при неизменном напряжении, приложенном к ее выводам и не зависящем от нагрузки (сеть бесконечной мощности), задачу оптимизации машины следует проводить по минимуму суммарных затрат.

Широкое применение вычислительных машин при проектировании электрических машин ставит задачу изменения математической модели, которая положена в основу проектирования. Перспективной может стать модель, составленная на базе дифференциальных уравнений.

Задача оптимального проектирования электрической машины или серии машин может быть представлена как общая задача нелинейного математического программирования, которая сводится к нахождению минимума или максимума критерия оптимальности при наличии определенного числа независимых переменных проектирования и функций лимитеров, представляющих собой технические или технологические требования-ограничения к проекту [15, 29, 30].

1.3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭВМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Для расчетов электрических машин в начале 50-х годов начали использовать ЭВМ. Во ВНИИЭМ ЭВМ использовались для расчетов серий асинхронных машин. В последние годы ЭВМ получили настолько большое применение, что в настоящее время ни один расчет электрических машин не обходится без применения ЭВМ.

В большинстве случаев ЭВМ используются для расчетов отдельных частей или всей электрической машины по существующим методикам. Применение ЭВМ обеспечивает ускорение вычислений, перебор многих вариантов, дает возможность в короткие сроки создать оптимальную электрическую машину.

Внедрение ЭВМ в проектирование привело к существенному повышению технико-экономических показателей электрических машин, снижению сроков проектирования, обеспечило качественный сдвиг в решении задач оптимального проектирования.

При проектировании электрических машин применяются как цифровые ЭВМ, так и аналоговые. Аналоговые ЭВМ удобно применять при ре-

шении задач динамики. Недостатками их являются ограниченный объем решаемой задачи и малая универсальность. Цифровые ЭВМ лишены этих недостатков, однако они требуют трудоемкого программирования. Чтобы избежать излишних потерь времени, целесообразно создавать универсальные программы и хранить их в банках данных.

В настоящее время решается задача комплексной автоматизации проектирования электрических машин. Этой цели служит система автоматизированного проектирования электрических машин (САПР ЭМ) (см. гл. 12).

САПР ЭМ — это сложный комплекс, позволяющий производить как расчетные, так и проектно-конструкторские работы. САПР ЭМ разбивается на ряд подсистем, каждая из которых решает определенные задачи синтеза на основе сложившихся принципов проектирования с взаимодействием "человек — ЭВМ". САПР ЭМ включает систему алгоритмов и создание на их основе пакетов прикладных программ. В первую очередь создается САПР асинхронных машин, которая должна обеспечить автоматизацию расчетных и графических работ. При этом машина представляется состоящей из стандартных узлов и деталей, которые конструируются в режиме "человек — ЭВМ" (см. гл. 12).

Широкая автоматизация проектных работ изменит в ближайшие годы процесс проектирования электрических машин, произойдут значительные изменения и в учебном проектировании. В гл. 12 дано описание учебной САПР ЭМ. Однако данное учебное пособие рассчитано на применение частных программ и мини-ЭВМ, так как пока еще не накоплен достаточный опыт промышленного автоматического проектирования электрических машин.

1.4. РАСЧЕТ ОТДЕЛЬНОЙ МАШИНЫ И СЕРИИ МАШИН

Электрические машины концентрируют энергию магнитного поля в воздушном зазоре. Объем активной части — пространство, в котором размещены сердечники и пазовые части обмоток, определяется произведением Dl_δ (1.1). Размеры D и l_δ называются главными размерами машины.

Расчетная мощность машины

$$P' = mI_{\text{ном}}E, \quad (1.2)$$

где $I_{\text{ном}}$ и E — соответственно номинальный ток и ЭДС обмотки статора для асинхронных и синхронных машин, а для машин постоянного тока — номинальный ток и ЭДС якоря; m — число фаз для машин переменного тока (для машин постоянного тока $m=1$).

Отношение

$$p_{\text{уд}} = P'/(D^2l_\delta) \quad (1.3)$$

определяет удельную мощность машины, т.е. мощность на единицу активной части. Удельная мощность характеризует степень использования материалов активной части и является важным показателем для сравнения машин различной мощности и конструктивного исполнения.

Более общим критерием является отношение момента, развиваемого машиной, к объему ее активной части, которое называют коэффициентом использования

$$k_{\text{и}} = \frac{P'/\Omega}{D^2 l_{\delta}} \quad (1.4)$$

В этом выражении Ω — угловая скорость ротора, а P'/Ω — момент на валу машины.

Эффективность использования объема активной части машины определяется электромагнитными нагрузками, линейной нагрузкой A и индукцией в воздушном зазоре B_{δ} . Линейная нагрузка определяется отношением тока всех витков обмотки к длине окружности. Ее значение показывает, какой ток приходится в среднем на единицу длины окружности зазора машины. Индукция в воздушном зазоре при данных диаметре по зазору и числе полюсов определяет поток машины и, следовательно, уровень индукции в участках магнитопровода.

Чем больше A и B_{δ} , тем больше коэффициент использования объема активной части $k_{\text{и}} \sim AB_{\delta}$. Однако с ростом мощности машины $k_{\text{и}}$ не остается постоянным, а увеличивается. Это объясняется тем, что с увеличением объема активной части площадь, с которой отводится тепло, увеличивается быстрее, чем объем машины. Если объем машины пропорционален линейному размеру в третьей степени, то поверхность этого объема пропорциональна линейному размеру в четвертой степени [14, 21].

Лучшие условия охлаждения в машинах большой мощности позволяют выбирать большие A и B_{δ} , что обеспечивает лучшее использование материалов. Поэтому машинная постоянная C_A остается "постоянной" лишь в определенном диапазоне мощностей. С ростом мощности машины растет и C_A .

Наибольшие допустимые уровни электромагнитных нагрузок для конкретных машин определяются допустимым нагревом активных частей, так как с ростом A и B_{δ} увеличиваются потери в единице активного объема машины. На основании опыта проектирования и эксплуатации электрических машин выработаны определенные диапазоны возможных значений A и B_{δ} для различных типоразмеров машин, при которых нагрев их активных частей не превышает допустимого для принятого класса изоляции обмоток. Значения электромагнитных нагрузок задаются в виде рекомендаций в соответствующих расчетных методиках и служат основой для правильного выбора объема активной части. С разви-

тием теории и практики электромашиностроения коэффициент использования объема активной части машин повышается.

Переход на более нагревостойкую изоляцию позволяет рассчитать машины на большие превышения температуры обмоток, что дает возможность при той же мощности уменьшить габариты машины.

То же самое происходит, если в машине применена более совершенная система охлаждения — водородная, жидкостная, форсированные системы или внутреннее охлаждение. В этих случаях при том же превышении температуры способность рассеивать тепло также возрастает и объем активной части машины может быть уменьшен. Однако при слишком больших нагрузках значительно снижаются КПД и $\cos\varphi$.

Использование новых сортов электротехнических сталей с лучшими магнитными свойствами и меньшими удельными потерями и новых электроизоляционных материалов, позволяющих уменьшить толщину изоляции и за счет этого снизить плотность тока в обмотках, приводит к уменьшению потерь и необходимого объема активной части.

Поиски новых конструктивных решений, применение вычислительных машин, новых методов оптимизации, обобщение опыта проектирующих организаций позволяют создавать электрические машины с лучшими энергетическими характеристиками и меньшей массой.

За счет применения новых электроизоляционных и магнитных материалов, совершенствования конструкции и систем охлаждения, развития теории и применения ЭВМ удалось снизить массу электрических машин общего назначения в 2—3 раза (см. рис. 1.1).

При проектировании новых машин и, в частности, при выполнении учебных проектов необходимо ориентироваться на современное конструктивное исполнение электрических машин, предусматривать применение новых электротехнических материалов.

Ориентируясь на рекомендованные в методиках значения электромагнитных нагрузок и используя выражение для машинной постоянной, можно достаточно точно найти объем активной части проектируемой машины $D^2 I_\delta$, при котором ее превышение температуры будет соответствовать допустимому. Однако этот объем может быть получен при различных сочетаниях значений D и I_δ . Аналитических зависимостей, однозначно определяющих эти величины для конкретных машин, не существует. В практике проектирования предварительно определяют диаметр D . Для этой цели обычно используют кривые, характеризующие среднюю зависимость $D = f(P/n)$ для большого числа построенных и эксплуатируемых машин данного типа (где P — мощность машины). После этого с учетом выбранных электромагнитных нагрузок определяют I_δ , исходя из машинной постоянной.

Проверкой правильности выбора D является значение отношения I_δ/D или более часто принятое в практике отношение $\lambda = I_\delta/\tau$, где по-

люсное деление $\tau = \pi D/2p$. Число полюсов обычно известно или определяется из технического задания.

Значение λ характеризует основные размерные соотношения в машине. Большие λ имеют машины относительно малого диаметра и большой длины, и, наоборот, малые значения λ — короткие машины с большим диаметром. В первом случае машины имеют меньшую массу и меньшую высоту оси вращения. В них лучше используется медь обмотки, так как длина лобовых частей катушек по сравнению с длиной их пазовых частей становится меньше. Момент инерции машин меньше при больших λ , чем при малых λ , что особенно важно при проектировании двигателей, предназначенных для работы с частыми пусками.

Однако относительное увеличение длины машины при больших λ затрудняет условия их охлаждения, а в машинах постоянного тока приводит к ухудшению коммутации. В машинах небольших габаритов с увеличением λ возникают трудности с выполнением необходимого для нормальной работы числа пазов.

Анализ этих зависимостей и опыт эксплуатации позволили определить для различных типов машин диапазоны значений λ , при которых обеспечиваются их экономичность и хорошие эксплуатационные данные. Эти рекомендации служат критерием проверки правильности предварительного выбора D для проектируемой машины. Конкретные диапазоны возможных λ для различных типов машин приведены в соответствующих главах книги.

При проектировании индивидуальной машины необходимо по возможности использовать имеющиеся на заводе штампы, модели, шаблоны и т.п. и так выбирать размеры, чтобы максимально использовать существующие узлы и детали.

В индивидуальном исполнении проектируют только машины для специальных применений. Обычно электрические машины выпускают сериями. Серия — ряд машин возрастающей мощности, имеющих одну конструкцию и единую технологию производства на больших участках серии и предназначенных для массового производства. При проектировании серий машин важнейшее значение имеют вопросы унификации деталей, конструктивных узлов и нормализации ряда размеров. Все это связано с рациональной организацией производства как внутри завода, так и в объединении, выпускающем единую серию машин. При этом необходимо заботиться об экономической эффективности целой серии машин, а не одной машины.

При проектировании серий асинхронных машин выбирают внешние диаметры статора таким образом, чтобы при одном и том же внешнем диаметре при изменении длины машины получить несколько машин на различные мощности и частоты вращения. Для машин постоянного тока выбирают одинаковым диаметр якоря и, изменяя длину машины, проектируют на нем несколько машин различной мощности и на разные частоты вращения.

Такое построение серий приводит к сокращению количества штампов, уменьшению количества моделей для отливки станин и подшипниковых щитов, сохранению одних и тех же диаметров валов, унификации подшипниковых щитов, сокращению количества оснастки и измерительного инструмента. Широкая унификация облегчает применение гибких автоматизированных производств, облегчает кооперацию между заводами.

Начиная с 1950 г. асинхронные двигатели выпускаются в виде единых серий. Первой была серия А(АО), заменившая серии И2, АД, "Урал" и др.

В настоящее время выпускается единая серия асинхронных двигателей 4А и АИ. В серии 4А 17 габаритов, число ступеней мощности составляет 33, диапазон мощностей 0,06–400 кВт; высоты осей вращения 50–355 мм.

На базе единых серий изготавливаются двигатели различных исполнений, предназначенные для работы в специальных условиях. Так, на базе серии 4А выпускаются следующие электрические модификации: с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, 10-полюсные и 12-полюсные, многоскоростные, на частоту сети 60 Гц, однофазные, с фазным ротором и другие, специализированные по таким конструкциям: встраиваемые, с встроенным электромагнитным тормозом, малощумные, с встроенной температурой защитой, с повышенной точностью по установочным размерам, высокоточные; специализированные по следующим условиям окружающей среды: влагоморозостойкие, химостойкие, тропические; узкоспециализированного исполнения: для сельского хозяйства, для судов морского флота, для холодного климата, лифтовые, фреомаслостойкие, полиграфические, швейные и др.

Непрерывно возрастающие требования к современным системам электропривода могут быть удовлетворены только при применении регулируемых электродвигателей, и, прежде всего, двигателей постоянно-го тока.

Первой общесоюзной серией машин постоянного тока с нормализованной шкалой номинальных мощностей и частот вращения была серия П, созданная в 1956 г.

В 1974 г. в серии 2П впервые были применены установочно-присоединительные размеры двигателей, увязанные с номинальной мощностью, в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК). По сравнению с серией П в двигателях серии 2П мощность при одной и той же высоте оси вращения увеличена в 3–5 раз, а диапазон регулирования — в 1,6 раза.

Стремление удовлетворить потребность в широкорегулируемых двигателях для гибких автоматизированных систем и робототехники привело к созданию в 1984 г. двигателей серии 4П. В двигателях этой серии применены компенсационная обмотка, шихтованный магнитопровод,

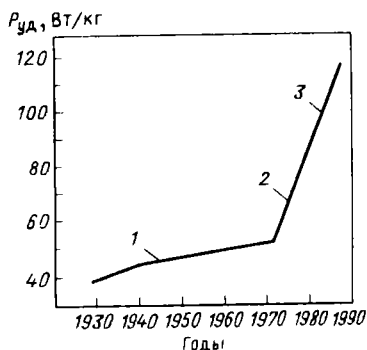


Рис. 1.2. Снижение массы двигателей постоянного тока:

1 — станина круглая; 2 — станина квадратная, улучшенная вентиляция; 3 — форсированное охлаждение

квадратная станина, изоляция класса нагревостойкости F и форсированное охлаждение.

За счет улучшения конструкции, форсированного охлаждения и применения изоляционных материалов, допускающих более высокие превышения температуры, удалось в течение 50 лет снизить расход материалов в 3 раза (рис. 1.2).

В серии 4П проведена унификация по деталям, сборочным единицам и в целом конструкции машин постоянного тока с асинхронными двигателями серий 4А и АИ. Это позволяет обеспечить дальнейшую кооперацию производства двигателей и снизить их себестоимость [13].

1.5. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Почти все электрические машины имеют вращательное движение, причем вращается одна часть машины — ротор.

Независимо от рода питания (постоянного или переменного тока) электрические машины можно разделить на явно- и неявнополюсные.

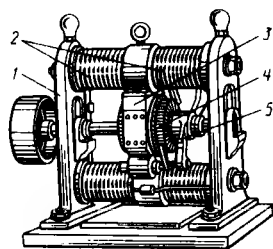
К неявнополюсным машинам относятся асинхронные машины и быстроходные синхронные машины (турбогенераторы и турбодвигатели).

Явно выраженные полюсы могут быть расположены либо на роторе (синхронные машины), либо на статоре (машины постоянного тока). В специальных случаях машины постоянного тока могут быть с вращающимися обмотками возбуждения, а синхронные машины — с неподвижными. Такие машины принято называть обращенными.

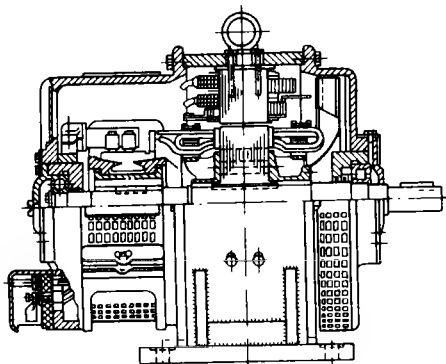
За 100 лет промышленного применения электрических машин их конструкция претерпела значительные изменения. На рис. 1.3, а дана одна из первых конструкций машины постоянного тока, сконструированной З. Граммом и изготовленной фирмой "Альянс" в середине семидесятых годов прошлого века. В этой машине на станине 1 укреплены

Рис. 1.3. Машина постоянного тока:

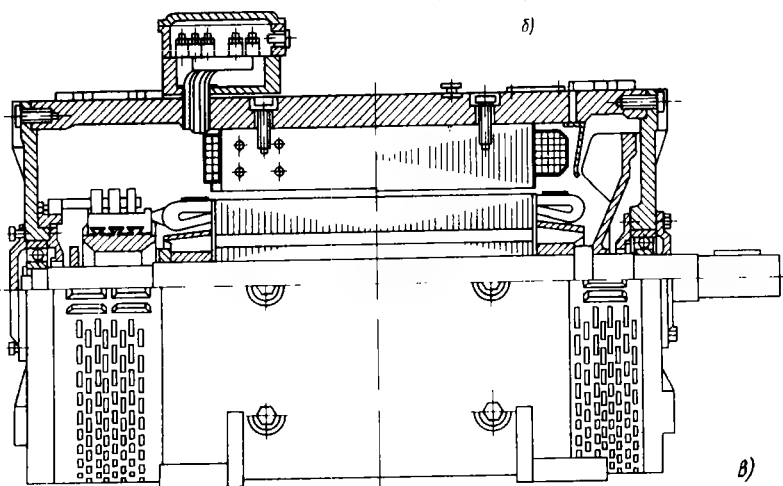
а — фирмы "Альянс"; б — серии ПН; в — серии 2П; г — серии 4П



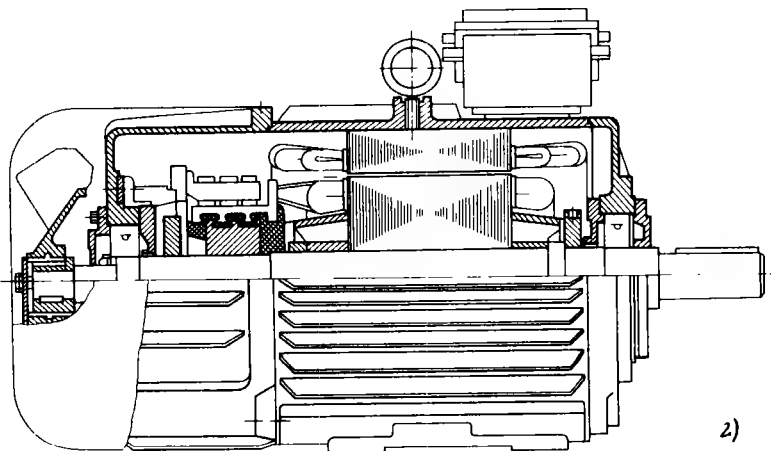
a)



б)



в)



г)

электромагниты 2 с полюсными наконечниками 3, между которыми вращается якорь 4. Щетки скользят по коллектору 5.

На рис. 1.3б представлен общий вид машины постоянного тока серии ПН, которая выпускалась в СССР после Отечественной войны. На рис. 1.3, в дана конструкция машины серии 2П, которая выпускалась в начале 70-х годов.

Конструкция машины новой серии 4П показана на рис. 1.3, г. Эта унифицированная конструкция, имеющая ряд деталей, заимствованных от серии асинхронных машин 4А, выпускается с середины 80-х годов.

Условия, в которых работают электрические машины, классифицируют по ряду признаков (направление оси вала, чистота окружающего воздуха, его температура, влажность и т.п.), в зависимости от которых выпускают машины различных конструктивных исполнений.

При эксплуатации электрических машин возникает необходимость устанавливать их не только в горизонтальном, но и в вертикальном положении. В зависимости от способа крепления, направления оси вала и конструкции подшипниковых узлов конструктивные исполнения машин по способу монтажа делят на девять конструктивных групп (ГОСТ 2479-79), каждая из которых подразделяется, в свою очередь, на несколько форм исполнения. Условное обозначение содержит буквы латинского алфавита ИМ и четыре цифры. Первая цифра определяет группу конструктивного исполнения (от 1 до 9), вторая и третья — способ монтажа и направление конца вала, четвертая — исполнение конца вала (от 0 до 8).

Структура условного обозначения конструктивного исполнения электрических машин по способу монтажа:

$$\text{ИМ} \begin{array}{cccc} \frac{\text{X}}{1} & \frac{\text{X}}{2} & \frac{\text{X}}{3} & \frac{\text{X}}{4} \end{array}$$

Группы конструктивных исполнений:

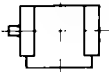
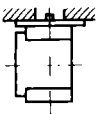
- 1 — на лапах с подшипниковыми щитами (с пристроенным редуктором);
- 2 — на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах);
- 3 — без лап, с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите (или щитах), с цокольным фланцем;
- 4 — без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине;
- 5 — без подшипниковых щитов;
- 6 — на лапах с подшипниковыми щитами и стояковыми подшипниками;
- 7 — на лапах со стояковыми подшипниками (без щитов);
- 8 — с вертикальным валом, кроме групп от ИМ1 до ИМ4;
- 9 — специального исполнения по способу монтажа.

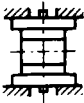
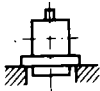
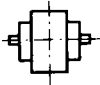
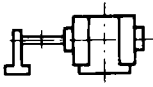
Исполнения концов вала (концом вала называется его часть, выступающая за подшипник):

- 0 — без конца вала;
- 1 — с одним цилиндрическим;
- 2 — с двумя цилиндрическими;
- 3 — с одним коническим;
- 4 — с двумя коническими;
- 5 — с одним фланцевым;
- 6 — с двумя фланцевыми;
- 7 — с фланцевым со стороны привода и цилиндрическим на противоположной стороне;
- 8 — все прочие исполнения концов вала.

Примеры условного обозначения форм конструктивного исполнения электрических машин приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Примеры условного обозначения форм конструктивного исполнения электрических машин

Группа исполнения	Конструктивное исполнение	Обозначение
IM1 Машины на лапах с подшипниковыми щитами	С двумя подшипниковыми щитами, на лапах, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM 1001 
	То же, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вниз	IM 1011 
IM2 Машины на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах)	На лапах, с фланцем на одном подшипниковом щите, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM 2001 
	На лапах, с фланцем на одном подшипниковом щите, недоступным с обратной стороны, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вверх	IM 2131 

Группа исполнения	Конструктивное исполнение	Обозначение
IM3 Машины без лап, с подшипнико- выми щитами, с фланцем на од- ном подшипни- ковом щите (или щитах)	С двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на стороне <i>D</i> , доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM 3001 
	С двумя подшипниковыми щитами, с фланцами, доступными с обратной стороны на обоих подшипниковых щит- тах, вал вертикальный с цилиндричес- кими концами	IM 3912 
IM4 Машины без лап с фланцем на ста- нине	С двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на стороне <i>D</i> , доступным с обратной стороны, вал горизонталь- ный с цилиндрическим концом	IM 4001 
	С одним подшипниковым щитом, с фланцем на стороне <i>N</i> , доступным с обратной стороны, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направлен- ным вверх	IM 4731 
IM5 Машины без под- шипниковых щит- тов	Без станины с ротором и горизонталь- ным валом с цилиндрическим концом	IM 5001 
	Со станиной на лапах, с ротором, без вала	IM 5410 
IM6 Машины с подшип- никовыми щита- ми и стояковы- ми подшипни- ками	На лапах с двумя подшипниковыми щит- тами, с одним стояковым подшипником на стороне <i>D</i> , без фундаментной плиты	IM 6000 

Группа исполнения	Конструктивное исполнение	Обозначение
IM7 Машины со стоячковыми подшипниками (без подшипниковых щитов)	Со станиной на лапах, с фундаментной плитой, с одним стоячковым подшипником на стороне <i>N</i> , с одним подшипниковым щитом	IM 6211
	Без фундаментной или опорной плиты, станина на лапах, с одним стоячковым подшипником	IM 7001
	С фундаментной плитой на приподнятых лапах, с двумя стоячковыми подшипниками	IM 7610
IM8 Машины с вертикальным валом, кроме машин групп от IM1 до IM4	С подпятником и направляющим подшипником, расположенными под ротором, с валом, без маховика	IM 8201
	С подпятником и направляющим подшипником, расположенными под ротором, с валом, без маховика	IM 8411
IM9 Машины специального исполнения по способу монтажа	Встраиваемое исполнение с цилиндрической станиной (или без станины), с двумя подшипниковыми щитами, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM 90001
	С двумя подшипниковыми щитами на лапах в горизонтальной плоскости, вал вертикальный с цилиндрическим концом	IM 9631

Примечание. Под стороной вала D понимается сторона, обращенная к приводному механизму для двигателей, а для генераторов – сторона, обращенная к турбине или дизелю. При двух концах вала D – сторона вала с концом большего размера, а при равных диаметрах для машин на лапах с коробкой выводов, расположенных не сверху, – сторона, с которой коробка выводов видна справа.

Электрические машины эксплуатируются в различных климатических условиях, при различных влажности, температуре окружающего воздуха, давлении (различной высоте над уровнем моря), в атмосфере, содержащей те или иные коррозионно-активные элементы, и при других условиях, существенно отличающихся от нормальных. В нашей стране за нормальные условия принимают температуру окружающей среды $(+25 \pm 10)^\circ\text{C}$, относительную влажность воздуха 35–80% и атмосферное давление 84–106 кПа. Чем более отличны условия, в которых эксплуатируется машина, от нормальных, тем значительно отличается конструкция ее корпуса, обмоток, различных уплотнений и изоляции от принятых в машинах общего назначения. ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-89Е классифицируют макроклиматические районы и места установки машин в зависимости от факторов, влияющих на условия эксплуатации электрических машин, и определяют обозначения машин, предназначенных для работы в тех или иных условиях (табл. 1.2).

Категория размещения электрических машин обозначается цифрой (от 1 до 5), следующей за буквенным обозначением климатического исполнения. Машины, которые могут эксплуатироваться на открытом воздухе, обозначаются цифрой 1, в закрытом помещении, где температура и влажность воздуха несущественно отличаются от колебаний наружного воздуха, – 2, если машины рассчитаны на работу в закрытых помещениях, в которых колебания температуры и влажности, а также воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе, – 3; в помещениях с искусственно регулируемые климатическими условиями, например в закрытых отапливаемых помещениях, – 4; в помещениях с повышенной влажностью, в которых возможно длительное наличие воды и происходит частая конденсация влаги на стенах и потолке, например в неотапливаемых и неventилируемых подземных помещениях, – 5.

Обозначение ХЛ1 означает, что машина может работать в районах с холодным климатом при установке на открытом воздухе. Двигатели общего назначения, к которым не предъявляют каких-либо дополнительных требований, имеют исполнение У3 или У4, т.е. они могут работать в районах с умеренным климатом в закрытых помещениях категории 3 или 4.

Таблица 1.2. Условное обозначение климатического исполнения электрических машин

Исполнение	Обозначение
Электрические машины, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озерах для макроклиматических районов :	
с умеренным климатом	У
с холодным климатом	ХЛ
с влажным тропическим климатом	ТВ
с сухим тропическим климатом	ТС
как с сухим, так и с влажным тропическим климатом	Т
для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение)	О
Электрические машины, предназначенные для установки на морских судах для макроклиматических районов :	
с умеренно холодным морским климатом	М
с тропическим морским климатом для судов каботажного плавания или иных, предназначенных для плавания только в тропической зоне для неограниченного района плавания	ТМ ОМ
Электрические машины, предназначенные для всех макроклиматических районов на суше и на море	В

Существуют исполнения по степени защиты от попадания внутрь машины твердых посторонних тел и воды и от соприкосновения обслуживающего персонала с токоведущими и вращающимися частями, находящимися внутри машины. Этот вид исполнения обычно называют исполнением по степени защиты. ГОСТ 14254-80 устанавливает буквенно-цифровое обозначение исполнения, состоящее из латинских букв IP и двух цифр. Первая цифра (от 0 до 6) характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями, находящимися внутри машины, а также степень защиты самой машины от попадания в нее твердых посторонних тел; вторая цифра (от 0 до 8) — степень защиты машины от проникновения в нее воды (табл. 1.3 и 1.4).

Открытые машины, в конструкции которых не предусмотрено никаких мер для защиты, обозначаются IP00. Наиболее распространенными исполнениями по степени защиты являются IP22, IP23 и IP44. Первые два исполнения соответствуют защите от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины пальцев человека и твердых тел диаметром более 12 мм (первая цифра 2 в обозначениях), а также защите от попадания в них капель воды. Исполнение IP22 предусматривает защиту от проникновения внутрь машины капель, падающих под углом не более 15° к вертикали, а исполнение IP23 — под углом, не превышающим 60° к вертикали. Машины исполнений IP22 и IP23 называют каплезащищенными.

Таблица 1.3. Степени защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями электротехнических изделий и от попадания твердых тел внутрь корпуса

Первая цифра условного обозначения	Степень защиты
0	Специальная защита отсутствует
1	Защита от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела, например руки, и от проникновения твердых тел размером свыше 50 мм
2	Защита от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной не более 80 мм и от проникновения твердых тел размером свыше 12 мм
3	Защита от проникновения внутрь оболочки инструментов, проволоки и т.д. диаметром или толщиной более 2,5 мм и от проникновения твердых тел размером более 1 мм
4	Защита от проникновения внутрь оболочки проволоки и от проникновения твердых тел размером более 1 мм
5	Проникновение внутрь оболочки пыли не предотвращено полностью. Однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы изделия
6	Проникновение пыли предотвращено полностью

Машины исполнения IP44 выполнены защищенными от возможности соприкосновения инструментов, проволоки или других подобных предметов, толщина которых не превышает 1 мм, с токоведущими частями, а также от попадания внутрь машины твердых тел диаметром более 1 мм (первая цифра 4). Вторая цифра 4 обозначает, что машина защищена от попадания внутрь корпуса водяных брызг любого направления. Такие машины называют также брызгозащищенными.

Для специальных целей выпускают электрические машины с более высокой степенью защиты, например IP57. В этом исполнении машина защищена от попадания пыли внутрь корпуса и может работать, будучи погруженной в воду.

Исполнение по способу охлаждения электрических машин определяет ту или иную систему вентиляции, расположение вентилятора и систему забора охлаждающего воздуха. Машины исполнений IP22 и IP23 обычно выполняют с самовентиляцией и продувом воздуха через машину, при этом вентилятор располагается на валу машины, а воздух, проходя внутри корпуса, охлаждает обмотки и сердечники. Машины исполнения IP44 в большинстве случаев имеют наружный обдув. Охлаждающий воздух при этой системе охлаждения прогоняется вдоль наружной поверхности ребренного корпуса с помощью вентилятора, установленного вне корпуса на выступающем конце вала и с противоположной стороны от его выходного конца. Более подробно системы вентиляции и испол-

Таблица 1.4. Степени защиты электротехнических изделий от проникновения воды

Вторая цифра условного обозначения	Степень защиты
0	Защита отсутствует
1	Защита от капель воды: капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделие
2	Защита от капель воды при наклоне оболочки до 15° : капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделия при наклоне его оболочки на любой угол до 15° относительно нормального положения
3	Защита от дождя: дождь, падающий на оболочку под углом 60° от вертикали, не должен оказывать вредного воздействия на изделие
4	Защита от брызг: вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на изделие
5	Защита от водяных струй: струя воды, выбрасываемая в любом направлении на оболочку, не должна оказывать вредного воздействия на изделие
6	Защита от волн воды: вода при волнении не должна попадать внутрь оболочки в количестве, достаточном для повреждения изделия
7	Защита при погружении в воду: вода не должна проникать в оболочку, погруженную в воду, при определенных условиях давления и времени в количестве, достаточном для повреждения изделия
8	Защита при длительном погружении в воду: изделия пригодны для длительного погружения в воду при условиях, установленных изготовителем

нения машин по способу их охлаждения рассмотрены в последующих главах [23].

Все эти электрические машины имеют много общего в конструкции обмоток, сердечников, валов, торцевых щитов, подшипниковых узлов и корпусов. Однако различия в требованиях, предъявляемых при эксплуатации, не позволяют создать полностью идентичные конструкции всех типов электрических машин, так же как и методов их расчета и проектирования. Каждый из типов машин (асинхронные, синхронные и машины постоянного тока) имеет свои особенности конструкции.

Асинхронные двигатели выпускают двух типов: с роторами, имеющими фазную обмотку, и с короткозамкнутыми роторами. Более распространены двигатели с короткозамкнутыми роторами, так как отсутствие изоляции обмотки роторов и скользящих контактов делает их наиболее дешевыми в производстве и надежными в эксплуатации. Основным недостатком таких двигателей является отсутствие надежного и экономичного способа плавного регулирования частоты вращения.

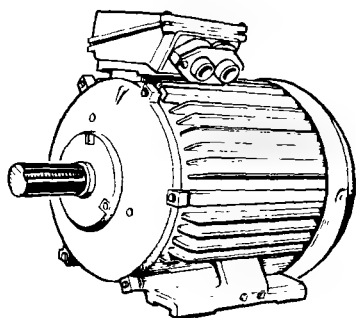


Рис. 1.4. Асинхронный двигатель серии 4А в закрытом обдуваемом исполнении 4А160УЗ

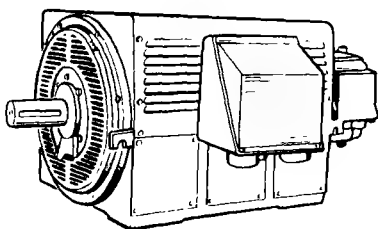


Рис. 1.5. Асинхронный двигатель с фазным ротором

В последнее десятилетие нашли применение вентильные двигатели, выполненные на базе асинхронных или синхронных двигателей с коммутаторами на тиристорах или транзисторах. Вентильные двигатели занимают среднее положение между двигателями постоянного тока и двигателями синхронными и асинхронными и применяются там, где необходимо изменять частоту вращения, а наличие коллектора и щеток нежелательно. Коммутатор, как правило, выполняется отдельно, а конструкция асинхронного или синхронного двигателя мало отличается от обычной.

Асинхронные двигатели общего назначения выпускаются на низкое напряжение мощностью от 0,6 до нескольких сотен киловатт и на высокие напряжения (3,6 или 10 кВ) мощностью до нескольких десятков тысяч киловатт. Наиболее распространены низковольтные двигатели малой и средней мощности.

На рис. 1.4 показан асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 15 кВт при $2p = 4$ на напряжение 220/380 В. Конструктивная форма исполнения двигателя IM1001, исполнение по степени защиты IP44. Такое исполнение характерно для большинства асинхронных машин мощностью менее 50–70 кВт. Низковольтные двигатели большей мощности с фазными и с короткозамкнутыми роторами выпускаются в большинстве случаев в двух исполнениях — IP23 и IP44.

На рис. 1.5 показан асинхронный двигатель серии 4А с фазным ротором мощностью 250 кВт при $2p = 4$, исполнение по степени защиты IP23. Основной конструкцией асинхронных двигателей являются серии 4АМ и АИ, которые отличаются друг от друга выполнением корпуса и подшипниковых узлов. Активные части в этих сериях идентичны.

Синхронные машины общего назначения распространены значительно меньше, чем асинхронные. Синхронные генераторы сравнительно небольшой мощности (до нескольких тысяч киловатт) применяются

в автономных установках. Синхронные двигатели не получили широкого распространения из-за более сложной конструкции, большей стоимости и худших пусковых характеристик. Они находят применение в приводах компрессоров, воздуходувок и т.п. Синхронные машины могут быть использованы одновременно и как двигатели, и как генераторы реактивной энергии, что дает им большое преимущество перед асинхронными двигателями, являющимися потребителями реактивной энергии.

Синхронные машины в зависимости от конструкции ротора делятся на явно- и неявнополюсные.

В явнополюсной конструкции более удобно располагать обмотку возбуждения, чем в пазах ротора с неявновыраженными полюсами. Поэтому все синхронные машины с числом пар полюсов более двух выполняются с явнополюсным ротором. В двухполюсных машинах из-за большой частоты вращения центробежные силы, действующие на ротор, настолько велики, что не удастся надежно закрепить на нем явно выраженные полюсы с обмоткой. Обмотку возбуждения приходится укладывать в отдельные пазы, рассредоточивая их по окружности ротора.

Синхронные машины общего назначения выполняют, в основном, с явнополюсными роторами. На рис. 1.6 показан синхронный двигатель мощностью 17 500 кВт на частоту вращения 375 об/мин. Из-за большой массы вала и ротора его подшипниковые узлы установлены на подшипниковых стойках вне корпуса машины.

Наряду с крупными синхронными машинами выпускают синхронные двигатели и генераторы мощностью менее 100 кВт на низкое напряжение. Для упрощения эксплуатации и повышения надежности они выполняются с самовозбуждением (обмотка возбуждения питается

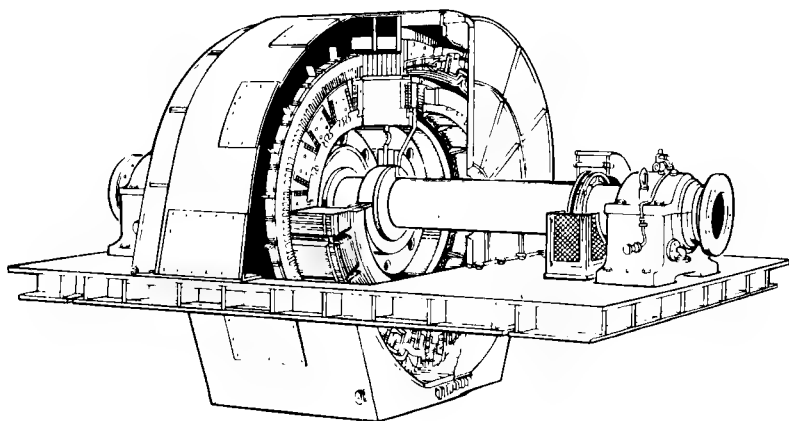


Рис. 1.6. Синхронный двигатель

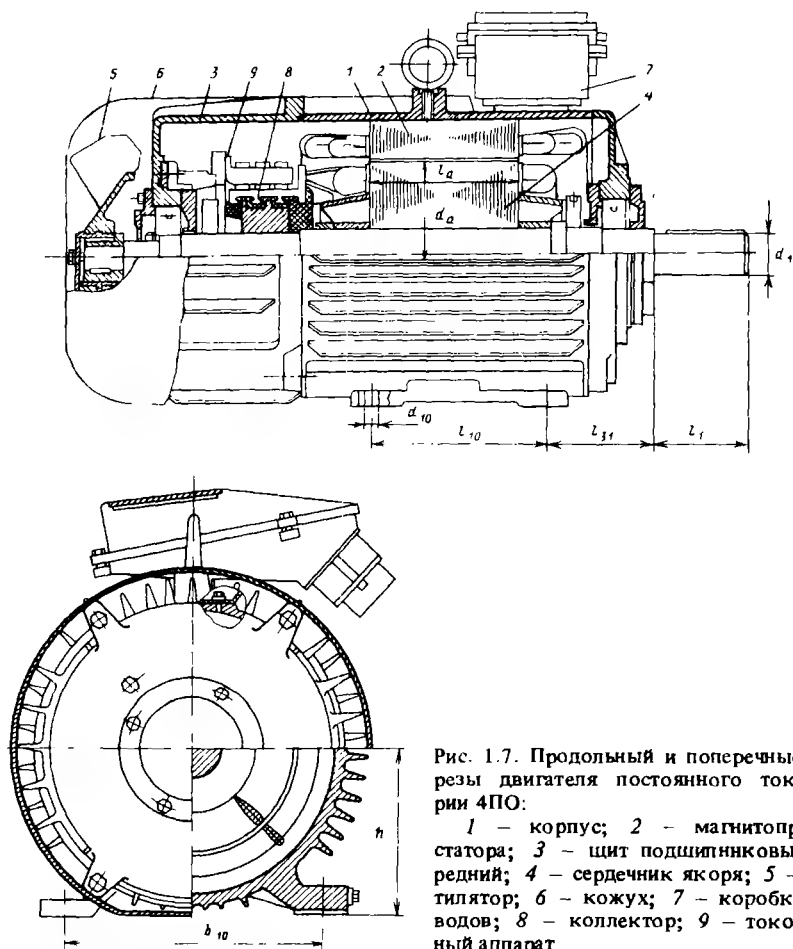


Рис. 1.7. Продольный и поперечные разрезы двигателя постоянного тока серии 4ПО:

1 — корпус; 2 — магнитопровод статора; 3 — щит подшипниковый передний; 4 — сердечник якоря; 5 — вентилятор; 6 — кожух; 7 — коробка выводов; 8 — коллектор; 9 — токоъемный аппарат

постоянным током от выводов статора через выпрямитель). В последние годы разработаны конструкции синхронных машин, в которых отсутствует скользящий контакт, при этом выпрямительные элементы установлены на роторе, а ток в обмотке возбуждения возникает за счет высших гармоник поля или с помощью бесконтактного возбуждателя.

Двигатели постоянного тока допускают плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне, обладают высокими пусковыми и перегрузочными моментами. Это определило их распространение в приводах, требующих изменения частоты вращения или специальных скоростных характеристик: в станкостроении, на электротранспорте,

в металлургической, в текстильной и полиграфической промышленности, других отраслях народного хозяйства.

Генераторы постоянного тока применяют для питания обмоток возбуждения синхронных машин, в системах генератор—двигатель и в некоторых специальных производствах, как, например, в химической промышленности для целей электролиза и т.п.

В то же время машины постоянного тока не получили такого широкого распространения, как асинхронные, из-за меньшей надежности, сложности эксплуатации и большей стоимости, обусловленных наличием в их конструкции механического преобразователя частоты коллектора. Эти машины могут иметь различные конструкции коллектора, якоря, обмоток и полюсов. Машины постоянного тока общего назначения, проектирование которых рассмотрено в последующих главах, имеют вращающийся якорь, цилиндрический коллектор и неподвижные полюсы с обмотками возбуждения, расположенными на станине.

На рис. 1.7 показан двигатель постоянного тока мощностью 110 кВт и номинальной частотой вращения 1500 об/мин, исполнения по степени защиты IP22. Такое исполнение является типичным для двигателей постоянного тока общего назначения, так как они большей частью устанавливаются в помещениях, в которых исключается попадание на машины капель, падающих под углом более 15° к вертикали.

С каждым годом в конструкцию серий машин переменного и постоянного тока вводится все большая унификация, различные узлы и детали машин стремятся делать одинаковыми. В то же время применение гибких автоматизированных производств позволяет выполнять большее число модификаций на основе базовой модели.

В последнее десятилетие проявляется тенденция к объединению электрических машин с управляющими силовыми полупроводниковыми элементами и микропроцессорами. При этом вентиляльные двигатели наряду с асинхронными двигателями и двигателями постоянного тока находят все большее применение. Создание серий электромеханических систем для широкого класса электроприводов внесет новые изменения в конструкцию электрических машин.

1.6. УНИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Стандартизация является частью общегосударственной технической политики, средством внедрения в производство передовых достижений науки, обеспечения оптимального уровня качества продукции, экономии трудовых и материальных затрат. Унификация базируется на анализе требований различных министерств и ведомств к разработке единых серий электрооборудования. На базе единых серий машин и трансформаторов разрабатываются модификации, предназначенные для

различных условий работы. Внутри серии проводится максимальная унификация узлов и деталей.

Стандартизация в электротехнической промышленности строится на базе государственной системы стандартизации (ГСС). Стандарты подразделяются на следующие категории: государственные стандарты (ГОСТ), отраслевые стандарты (ОСТ), республиканские стандарты (РСТ), стандарты предприятий (СТП).

Стандарты являются обязательными в пределах установленной сферы их действия, области и условий их применения.

Кроме стандартов утверждаются технические условия (ТУ), представляющие собой распространенный вид нормативно-технической документации.

В основу стандартизации подотраслевой электротехнической промышленности положены базовые стандарты. Таким стандартом для электрических машин является ГОСТ 183-74, устанавливающий общие технические требования на все электрические машины. На основе единых стандартов подотрасли устанавливаются стандарты на единые серии (например, на асинхронные, синхронные машины и др.).

При стандартизации электрооборудования применяются ряды предпочтительных чисел, построенные на геометрической прогрессии:

$$a; ax; ax^2; \dots; ax^{n-1}.$$

Оказалось достаточным иметь четыре десятичных ряда геометрической прогрессии:

Ряд	Знаменатель ряда	Количество членов в пределах ряда
R 5	$\varphi_5 = \sqrt[5]{10} \approx 1,6$	5
R 10	$\varphi_{10} = \sqrt[10]{10} \approx 1,25$	10
R 20	$\varphi_{20} = \sqrt[20]{10} \approx 1,12$	20
R 40	$\varphi_{40} = \sqrt[40]{10} \approx 1,06$	40

Каждый ряд построен на знаменателе прогрессии $\varphi_5, \varphi_{10}, \varphi_{20}, \varphi_{40}$ в интервале от 1 до 10. Числа свыше 10 получаются умножением на 10, 100, 1000 и т.д., а числа меньшие 1 — умножением на 0,1; 0,01; 0,0001 и т.д.

По предпочтительным числам и геометрическим рядам предпочтительных чисел построен ряд номинальных мощностей электрических машин и трансформаторов (ГОСТ 12139-84). Шкала регламентированных мощностей приведена в приложении 6. В стандартах на электрические машины устанавливаются размеры, технические требования, методы испытаний, номинальные напряжения в вольтах, частота вращения (синхронная) в оборотах в минуту и мощности в киловаттах или ваттах.

Размеры электрических машин, определяющие возможность их монтажа и сочленения с рабочими механизмами (высота оси вращения,

диаметры концов валов), устанавливаются в соответствии с ГОСТ 6636-75 "Номинальные линейные размеры". Этот ГОСТ устанавливает ряды линейных размеров в интервале от 0,001 до 20 000 мм, которые применяются в машиностроении.

Высоты оси вращения и установочные размеры электрических машин приведены в приложении 6.

Развитие международных связей и значительное увеличение объема электротехнической продукции, которой обмениваются разные страны, обуславливают необходимость международной стандартизации. Основные цели международной стандартизации определены Постоянным техническим комитетом Международной организации по стандартизации (СТАКО и ИСО). Международные стандарты ИСО и МЭК играют важную роль в создании новых серий электрических машин и ликвидации торговых барьеров между странами.

Аттестация качества продукции — один из постоянно действующих факторов, стимулирующих создание продукции, превосходящей по своим технико-экономическим показателям лучшие отечественные и мировые достижения.

В 1984 г. установлены единые и обязательные для всех министерств и ведомств правила аттестации промышленной продукции по двум категориям качества — высшей и первой.

К высшей категории качества относится продукция, которая по технико-экономическим показателям находится на уровне лучших мировых достижений или превосходит их, соответствует значениям, предусмотренным стандартами для вновь разработанной (модернизированной) и намечаемой к разработке продукции, и отвечает нормативно-техническим документам, по которым она выпускается.

До утверждения стандартов, устанавливающих значения показателей для вновь разработанной и намечаемой к разработке продукции, к высшей категории качества должна относиться продукция, по технико-экономическим показателям находящаяся на уровне лучших мировых достижений или превосходящая их, обеспечивающая значительное повышение производительности труда, экономию материалов, топлива и электроэнергии, удовлетворяющая потребности населения страны, конкурентоспособная на внешнем рынке и отвечающая нормативно-техническим документам, по которым она выпускается.

Такая продукция должна характеризоваться высокой стабильностью показателей качества, основанной на высоком техническом уровне производства, строгом соблюдении технологической дисциплины и высокой культуре производства.

К первой категории качества относится продукция, отвечающая нормативно-техническим документам, по которым она выпускается, содержащим современные требования, соответствующие значениям, предусмотренным стандартом для серийно выпускаемой продукции.

До утверждения стандартов, устанавливающих значения показателей для серийно выпускаемой продукции, к первой категории качества должна относиться продукция, по технико-экономическим показателям находящаяся на уровне современных требований народного хозяйства и населения страны и отвечающая нормативно-техническим документам, по которым она выпускается и имеет стабильные показатели качества.

Если представленная на аттестацию продукция не получает первой категории качества, она считается неаттестованной и подлежит снятию с производства. Продукция, неаттестованная при повторной аттестации по высшей или первой категории качества, подлежит снятию с производства в месячный срок после принятия решения государственной аттестационной комиссией.

Продукция относится к высшей или первой категории качества на срок до трех лет. Продление срока действия категории качества без проведения аттестации продукции не допускается.

1.7. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Повышение надежности электрических машин — важная задача электротехнической промышленности. Увеличение срока службы и повышение надежности дают относительно больший народно-хозяйственный эффект, чем снижение удельного расхода материалов при изготовлении электрических машин.

Согласно ГОСТ 27.002-89 "Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения" надежность определяется как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Для объектов в зависимости от назначения применяют различные показатели надежности. Различают восстанавливаемые и невозстанавливаемые объекты. Если нормативно-технической и конструкторской документацией предусмотрено проведение ремонта объекта, то он называется ремонтируемым. Неремонтируемые объекты работают до первого отказа, после чего они снимаются с эксплуатации. Значительное число электрических машин относятся к неремонтируемым объектам.

Для различных видов электрических машин и условий эксплуатации основные понятия теории надежности — безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость — имеют различную относительную значимость. Для неремонтируемых электрических машин основным показателем является безотказность. Для остальных машин большое значение имеет ремонтпригодность.

Безотказность — это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Ремонтопригодность — свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Сохраняемость — свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и транспортирования.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. При оценке надежности электрических машин необходимо заранее оговорить, какое состояние считается неработоспособным. По характеру возникновения различают отказы внезапные, характеризующиеся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта, и отказы постепенные, характеризующиеся постепенным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Внезапные отказы обычно проявляются в виде повреждений элементов (обрывы, пробой изоляции, образование трещин, поломки). Постепенные отказы связаны с износом и старением элементов и материалов (износ щеток и коллектора, старение изоляции).

По условиям создания и работы объектов различают конструкционные, производственные и эксплуатационные отказы. Они характеризуют основные причины их возникновения: при конструировании — несовершенство или нарушение установленных норм и правил конструирования и проектирования, при производстве — нарушение или несовершенство установленного процесса изготовления или ремонта, при эксплуатации — нарушение установленных правил и условий эксплуатации.

Для оценки надежности неремонтируемых электрических машин используют вероятностную характеристику случайной величины — наработку до отказа T , под которой понимают наработку объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

Распределение наработки до отказа может быть описано вероятностью безотказной работы $P(t)$, плотностью распределения наработки до отказа $f(t)$ и интенсивностью отказов $\lambda(t)$. Вероятностью безотказной работы $P(t)$ называют вероятность того, что величина T — наработка до отказа — будет не меньше заданной:

$$P(t) = P\{T \geq t\}. \quad (1.5)$$

Во многих задачах требуется определить вероятность безотказной работы объекта за время t — вероятность того, что в пределах заданной наработки не возникает отказа объекта, т.е. вероятность $P(t_1, t_2)$ безотказной работы в интервале наработки (t_1, t_2) . Она равна отношению вероятностей безотказной работы в начале и в конце интервала:

$$P(t_1, t_2) = P(t_2)/P(t_1). \quad (1.6)$$

Статистически вероятность безотказной работы определяется отношением числа объектов, безотказно проработавших до момента t , к числу объектов, работоспособных в начальный момент времени:

$$P(t) = [N - n(t)]/N, \quad (1.7)$$

где N — число объектов в момент начала наблюдений или испытаний; $n(t)$ — число объектов, отказавших за время t .

Вероятность отказа объекта

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (1.8)$$

Надежность ряда ремонтируемых объектов не всегда удобно характеризовать вероятностью безотказной работы, так как $P(t)$ у них весьма близка к единице, особенно для небольших интервалов наработки, поэтому используется другой показатель надежности — плотность распределения наработки до отказа:

$$f(t) = dQ(t)/dt = -dP(t)/dt, \quad (1.9)$$

где

$$P(t) = - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt; \quad (1.10)$$

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt. \quad (1.11)$$

Для неремонтируемых объектов используется другой показатель — интенсивность отказов $\lambda(t)$. Интенсивность отказов — условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник:

$$\lambda(t) = f(t)/P(t), \quad (1.12)$$

где

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.13)$$

$$\text{При } \lambda(t) = \lambda = \text{const } P(t) = e^{-\lambda t}.$$

Статистически интенсивность отказов определяют следующим образом:

$$\lambda(t) = n(\Delta t)/(N_{\text{ср}} \Delta t), \quad (1.14)$$

где $N_{\text{ср}} = (N_i + N_{i+1})/2$ — среднее число объектов, исправно работающих в интервале Δt ; N_i — число работоспособных объектов в начале интервала Δt ; N_{i+1} — число работоспособных объектов в конце интервала Δt ; n — число отказавших объектов в интервале Δt .

Одним из показателей безотказности является средняя наработка до отказа — математическое ожидание наработки объекта до первого отказа:

$$M[T] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.15)$$

На практике используется следующая оценка средней наработки до отказа:

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (1.16)$$

где t_i — наработка до отказа i -го объекта; N — число объектов.

Для восстанавливаемых объектов пользуются средней наработкой на отказ — отношением суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Наиболее распространенными показателями долговечности электрических машин являются средний ресурс и средний срок службы. Средний ресурс — математическое ожидание ресурса. Ресурс — это суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние. Средний срок службы — математическое ожидание срока службы. Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Для характеристики нескольких свойств надежности объектов используют комплексные показатели надежности. Среди них большое значение имеет коэффициент готовности:

$$k_r = T_O / (T_O + T_B), \quad (1.17)$$

где T_O — средняя наработка на отказ; T_B — среднее время восстановления.

При рассмотрении работоспособности электрических машин наблюдаются характерные периоды, отражающие главные причины их отказов (рис. 1.8). Период I — это период приработки, когда при испытаниях или начальной стадии эксплуатации происходят выявление и отбраковка конструктивных и производственных недостатков. Для предотвращения отказов в эксплуатации в период приработки производят замену дефект-

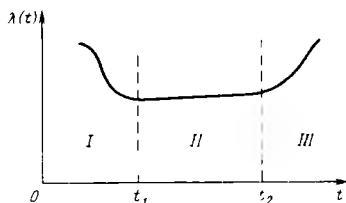


Рис. 1.8. Интенсивность отказов

ных деталей исправными и, если это возможно, приработку отдельных узлов. Для электрических машин производится проверка изоляции обмоток, притирка щеток на коллекторе или контактных кольцах, настройка систем регулирования и возбуждения, наладка подшипниковых узлов. Для ответственных электрических машин период приработки происходит непосредственно на заводе-изготовителе, чтобы избежать отказы в эксплуатации, обусловленные производственными причинами.

В большинстве случаев в период приработки вероятность безотказной работы может быть описана законом Вейбулла

$$P(t) = e^{-t_m/t_0}, \quad (1.18)$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы за время t ; t_m , t_0 — параметры.

После периода приработки начинается период нормальной эксплуатации II, когда интенсивность отказов падает и в течение длительного времени остается примерно постоянной. В этот период происходят внезапные отказы, т.е. может иметь место случайное повышение нагрузки. Распределение наработки до отказа описывается показательным законом, при этом функция плотности распределения

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t). \quad (1.19)$$

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \quad (1.20)$$

При постоянной величине интенсивности отказов средняя наработка до отказа

$$T = 1/\lambda. \quad (1.21)$$

Период работы электрических машин III характеризуется увеличением интенсивности отказов. С момента времени t_2 элементы и узлы машины начинают отказывать чаще, что вызвано их старением и износом. У электрических машин в этот период отмечается существенное нарушение свойств изоляции, уменьшение ее электрической прочности, износ тел качения подшипников, изменение структуры смазки, износ коллектора и изменение структуры материала коллекторных пластин, повышение вибрации и т.д.

Распределение наработки до отказа по причине изнашивания и старения описывают с помощью нормального закона. Так как наработка до

отказа является случайной величиной, которая может принимать только положительные значения, то распределение T может быть усеченно-нормальным. Оно получается из нормального при ограничении интервала возможных значений этой величины.

Плотность усеченного нормального распределения определяется из выражения

$$\bar{f} = cf(t), \quad (1.22)$$

где c — нормирующий множитель; $f(t)$ — функция нормального распределения наработки до отказа:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi\sigma} e^{-\frac{(t - m_t)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.23)$$

где m_t — математическое ожидание; σ — среднеквадратичное отклонение.

Величина c в (1.22) определяется с помощью нормированной функции Лапласа $\Phi(U)$:

$$c = 1/[\Phi(U_2) - \Phi(U_1)], \quad (1.24)$$

где

$$U_1 = (t_1 - m_t)/\sigma; \quad U_2 = (t_2 - m_t)/\sigma;$$

t_1, t_2 — интервалы ограничения средней наработки до отказа.

Практика эксплуатации электрических машин позволила наиболее полно исследовать статистическими методами надежность асинхронных двигателей. Систематическое наблюдение двигателей от начала эксплуатации до капитального ремонта показало, что капитальному ремонту подвергаются 20% двигателей. При относительной простоте конструкции надежность асинхронных двигателей все еще остается низкой: средний срок службы составляет 20 тыс. ч (5 лет) и колеблется в зависимости от области применения — от 60 тыс. ч (в химической промышленности) до 6 тыс. ч (в горнодобывающей промышленности).

Основными причинами выхода из строя асинхронных двигателей являются их неудовлетворительная эксплуатация, несовершенная защита или ее отсутствие. При защите плавкими предохранителями двигатели отказывают из-за работы на двух фазах. Данные эксплуатации показывают, что 80% аварий от работы на двух фазах происходят из-за отсутствия тепловой защиты и 20% — из-за неисправности, а 15% двигателей отказывают также из-за несоответствия конструктивного исполнения условиям эксплуатации, наблюдаются также отказы двигателей, обусловленные неправильным выбором двигателей по мощности.

Иногда превышения температуры двигателей вызываются неравномерностью воздушного зазора, что приводит к задеванию ротора о статор машины. Это может быть обусловлено тем, что технологический процесс и состояние оборудования не обеспечивают требуемую обработку станин, подшипниковых узлов и пакетов ротора. Неравномерность воздушного зазора может быть вызвана и прогибом вала в случае его недостаточной жесткости. Причиной отказов обмоток двигателей нередко является низкое качество изоляции обмоточных проводов и пропитывающих лаков. Преждевременные отказы обмоток вызываются часто несовершенными технологическими процессами, некачественной пропиткой, намоткой и укладкой в пазы витков обмотки статора. Основные причины отказов можно количественно охарактеризовать следующим образом: неправильное применение — 15–35%, недостатки эксплуатации 25–50%, недостатки конструкции и технологии 30–35%. Лишь 10–12% двигателей выходят из строя вследствие процессов износа и старения.

В подавляющем большинстве случаев отказы двигателей происходят из-за повреждения обмоток 85–95%, 2–5% двигателей отказывают из-за повреждений подшипников. Основные отказы обмоток приходится на межвитковые замыкания 93%, пробой изоляции 2%, пробой межфазной изоляции 5%. Это распределение показывает, что основное внимание в асинхронных двигателях со внешней обмоткой должно быть уделено межвитковой изоляции.

Для межвитковой изоляции разработана математическая модель надежности. Элементами модели являются два витка, расположенных рядом в пазу или лобовой части и разделенных межвитковой изоляцией, состоящей из собственной изоляции обмоточного провода, пропиточного лака и воздушных прослоек. Для безотказной работы обмотки необходима исправность всех ее составляющих элементов. Отказ происходит тогда, когда приложенное напряжение к соседним виткам превышает пробивное напряжение межвитковой изоляции.

Вероятность безотказной работы межвитковой изоляции обмотки, состоящей из n пар проводников, равна:

$$P_B = \int_0^{\infty} q(U_B) [1 - F(U_B)]^n dU_B, \quad (1.25)$$

где $F(U_B)$ — функция распределения пробивного напряжения межвитковой изоляции; $q(U_B)$ — плотность распределения приложенных напряжений.

Распределение приложенного напряжения между витками зависит от напряжения на фазе, числа последовательно соединенных секций в фазе, кратности и распределения коммутационных напряжений вдоль обмотки и числа проводников в пазу. Пробивное напряжение изоляции обмоток зависит от свойств изоляционных материалов и условий эксплуатации.

Синхронные машины являются, в основном, крупными электрическими машинами, которые изготавливаются мелкими сериями, что затрудняет обработку статистических данных. Синхронные машины являются ремонтируемыми объектами, поэтому для таких машин важны, как показатели надежности, коэффициент готовности и среднее время восстановления. Синхронные машины отличаются тем, что имеют относительно высокое качество обслуживания; количество отказов по причинам, связанным с ошибками персонала соизмеримо с количеством отказов из-за дефектов изготовления. Вместе с тем в процессе эксплуатации обычно происходят доводка, усовершенствование, модернизация машины. Статистические данные свидетельствуют о том, что одной из основных причин отказов синхронных машин являются заводские дефекты. Число аварийных отключений, вызванных дефектами изготовления, значительно больше вызванных недостатками конструкции. В течение первого периода работы (5—10 тыс. ч) имеет место приработка, когда заменяются и ремонтируются детали, обладающие заводскими дефектами. Период нормальной эксплуатации составляет 15—20 лет, после чего начинаются отказы, связанные с износом и старением материалов и элементов конструкции.

Для оценки эксплуатационной надежности синхронных генераторов широко применяют такой показатель, как удельная повреждаемость. Это удельное число аварийных отключений, которое измеряется средним числом повреждений на одну машину в год, выраженное в процентах. Установлено, что повреждаемость, вызванная заводскими недостатками, составляет для турбогенераторов 3,5%, для гидрогенераторов 4%. Удельная повреждаемость возрастает с ростом мощности.

Большинство повреждений относится к обмотке статора. Основным местом повреждений изоляции обмоток статора является пазовая часть обмотки, пробой которой составляет примерно 50% всех пробоев обмоток статора. На процесс изменения и разрушения изоляции оказывает влияние возрастание нагрузок: повышенные механические усилия при переходных процессах, вибрация, перенапряжения, перегрузки по току. В процессе изготовления могут появиться участки с пониженной электрической прочностью. Это связано с изготовлением стержней обмоток с размерами, выходящими за пределы допуска, что приводит к повреждению изоляции при укладке обмотки в пазы. В процессе изготовления возможно попадание на поверхность изоляции ферромагнитных частиц, вибрация которых в магнитном поле приводит к постепенному разрушению изоляции. Вследствие поломки листов статора создаются условия повреждения изоляции стержней.

Надежность изоляции лобовых частей во многом определяется способом их крепления. Лобовые части обмоток крупных электрических машин наибольшей опасности подвергаются при переходных процессах, при этом возможны разрывы бандажей, деформация частей обмотки, появление трещин и вмятин в изоляции. В процессе эксплуатации синх-

ронных генераторов отмечаются также пробой изоляции вследствие попадания масла и влаги. Среди повреждений активной стали наиболее частыми являются ослабление запрессовки, расшатывание сердечника стали под действием вибрационных и магнитных сил, повреждение изоляционной пленки на поверхности листов.

На подвижных частях машины частые повреждения возникают на бандажных узлах. Они вызываются действием центробежных сил, деформациями вала и усилиями горячих посадок на вал. Под действием температуры происходят перемещение обмотки ротора, деформация проводников обмотки. Возможно также перекрытие каналов охлаждения и снижения сопротивления изоляции при попадании влаги, масла и пыли на обмотку.

Характерными повреждениями и нарушениями в работе подшипниковых узлов крупных синхронных машин являются выплавление баббита, повреждение вкладышей и цапф подшипниковыми токами. Выплавление баббита обычно происходит при нарушении работы системы маслоснабжения. Наиболее распространенной неисправностью подшипников является вытекание масла. Подшипниковые токи возникают из-за несимметрии в магнитной системе, обусловленной неравномерным зазором, наличием осевых каналов, несимметричным размещением сегментов активной стали. Замыкание обмотки ротора на корпус также приводит к появлению подшипниковых токов. Это явление сопровождается повреждением поверхностей вкладышей и шеек вала вследствие эрозии под воздействием разрывов.

Для обеспечения надежности крупных синхронных машин большое внимание уделяется контактно-щеточной системе и возбудителям. Число отказов возбудителей иногда превышает число отказов обмоток ротора и статора.

Статистическая обработка эксплуатационных данных показывает, что неравномерное токораспределение вызывает большой разброс скорости изнашивания щеток. Это вызвано многими причинами, среди которых важнейшими являются характеристики и конструкция материалов скользящего контакта, плотность тока под щетками и соотношение электрических и механических потерь в контакте, вид вольт-амперных характеристик щеток. При эксплуатации генераторов износ щеток и контактных колец зависит также от величины вибрации колец, удельного давления на щетки, попадания масла на щетки и на контактную поверхность колец из опорных подшипников. При эксплуатации турбогенераторов возможно отделение втулки контактных колец от вала в месте ее посадки. Это вызывает резкое увеличение вибрации колец и общее ухудшение работы щеточного аппарата.

Для оценки надежности синхронных генераторов средней мощности (до 100 кВт) с достаточной полнотой использовались статистические методы. Установлено, что вероятность безотказной работы генераторов

ЕС и ЕСС в период 0—4 тыс. ч описывается законом распределения Вейбулла. В период 4—12 тыс. ч распределение отказов является экспоненциальным. Характеристика отказов этих машин имеет общие черты с отказами крупных генераторов и асинхронных двигателей. Основными узлами, подверженными отказам, являются обмотки ротора и статора, блок регулирования напряжения, подшипниковый узел. Установлено, что среднее время наработки на отказ для различных типов крупных машин составляет 3—5 тыс. ч, а среднее время ремонта 10—35 тыс.ч.

Данные о причинах выхода из строя в период эксплуатации электрических машин постоянного тока как общего, так и специального назначения показывают, что большинство аварий происходят по вине обслуживающего персонала, который не всегда обеспечивает необходимый уход и качественное выполнение текущего ремонта. Среди других причин отказов следует отметить конструкционные недостатки и условия эксплуатации.

Наиболее частыми повреждениями возбудителей синхронных генераторов являются повреждения бандажей обмотки якоря, нарушения пайки петушков и износ коллектора, при этом надежность коллекторно-щеточного узла во многом зависит от мощности возбудителя.

В тяговых двигателях электровозов одной из частых причин отказов в работе является возникновение кругового огня на коллекторе. Это вызвано условиями эксплуатации (буксование колесных пар электровозов), невысоким качеством выпрямленного питающего напряжения, повышенными ударными и вибрационными нагрузками.

Для электрических машин постоянного тока общего назначения характерным повреждением является также неисправность коллектора. По статистике выход из строя этих машин из-за повреждений коллектора составляет 20% общего числа отказов. Относительно большое число повреждений коллекторов вызывается трением щеток. Скорость износа щеток не является величиной, одинаковой для всех щеток. Она зависит от следующих факторов: неправильной установки щеток, неисправностей щеткодержателей, попадания летучих фракций пропиточных лаков обмотки на коллектор, механических неисправностей коллектора, неправильного выбора марок и конструкции щеток. Механическая нестабильность скользящего контакта приводит также к разрушению щеток и арматуры.

Повреждения коллектора могут проявляться в нарушении цилиндричности поверхности коллектора из-за неравномерного ее износа и нарушений в механических узлах машины. На поверхности коллектора в процессе эксплуатации происходит нарушение полировки из-за подгорания пластин и царапин и неравномерности нажатия отдельных щеток на коллектор. К механическим факторам, влияющим на износ коллекторов, относятся давление щеток на коллектор, вибрация их и биение коллектора, высокая окружная скорость вращения. Износ коллектора зависит также от химических факторов, к которым относятся образо-

вание контактной пленки на поверхности коллектора, состав и влажность окружающей среды, наличие в среде активных веществ. Среди электрических факторов, влияющих на износ коллектора, следует отметить плотность тока под щетками, сопротивление переходных контактов щеток и коллектора, нарушение коммутации машины, которое приводит к появлению искрения под щетками.

Повреждение обмоток якорей машин постоянного тока проявляется в пробое корпусной изоляции между пакетом стали якоря и обмоткой и пробое изоляции между витками в якорях с многовитковыми секциями. В крупных машинах постоянного тока повреждения проявляются в распайке соединительных петушков коллекторных пластин с обмоткой и из-за разрушения проволочных бандажей.

Отказы механических узлов машин постоянного тока определяются, в основном, состоянием шеек вала и подшипников качения и скольжения. Повреждения подшипников скольжения и шеек вала выражаются в виде износа вкладышей в гнездах подшипников, вытекания смазки из подшипников при их неисправностях, нарушения работы смазочных колец в подшипниках. Отказы подшипников качения происходят из-за вытекания смазки из подшипников, поломки шариков или роликов между обоймами подшипников, разрушения сепаратора, заклинивания шариков в обоймах подшипников. Другим механическим узлом, который повреждается при эксплуатации электрических машин постоянного тока, является щеточная траверса. Повреждения этого узла проявляются в виде поломки кольца траверсы, закрепляющего ее на подшипниковом устройстве, расстройстве регулировки положения щеткодержателей на кольцах или bracketах траверсы.

Наряду со статистической обработкой данных эксплуатации для оценки надежности электрических машин используются также определительные и контрольные испытания. Определительные испытания проводятся для определения сравнительных показателей надежности, контрольные — для контроля соответствия показателей требованиям стандартов или технических условий.

Для определительных испытаний объем выборки (количество машин, случайным образом отобранных из партии или серии, подлежащих испытаниям) составляет 20–30 машин. Испытания проводятся до отказа всех машин выборки, что позволяет построить кривую вероятности безотказной работы в функции наработки.

Контрольные испытания проводятся либо для одного уровня (риск заказчика β), либо для двух (риск заказчика β и риск изготовителя α). Для соответствующих значений β и α определяется объем выборки, необходимый для подтверждения требуемого значения вероятности безотказной работы. После испытания машин в случае, если число отказавших во время испытаний машин α не превышает некоторого числа c — так называемого приемочного числа, требуемый уровень вероят-

ности безотказной работы $P(t)$ подтверждается. В противном случае гипотеза о соответствии надежности партии машин требуемому уровню отклоняется.

Испытания на надежность, как определительные, так и контрольные, весьма длительные и дорогостоящие. Кроме того, данные испытаний зачастую запаздывают и не могут дать оперативной коррекции при конструировании и совершенствовании технологии. Сокращение времени испытаний решается проведением форсированных испытаний на надежность. В этом случае испытания электрических машин проводятся в специальных условиях, характеризующихся повышенным уровнем некоторых воздействующих факторов: температуры окружающей среды, вибрации, номинальных частоты вращения и нагрузки, числа пусков, влажности, удельного нажатия и плотности тока под щеткой, запыленности.

Ускоренным испытаниям данного типа машин определенной мощности или диапазона мощностей предшествуют испытания по определению коэффициента ускорения. Коэффициент ускорения k_u есть отношение времени, в течение которого вероятность безотказной работы машины в номинальном режиме составляет $P(t)$, ко времени, в течение которого та же вероятность $P(t)$ будет в режиме форсировки. Необходимо соблюдение адекватности законов распределения в форсированном и нормальном режимах. Это, в свою очередь, означает, что при форсированных испытаниях не должна нарушаться физика старения и износа материалов и конструкции электрической машины. Количество факторов форсировки обычно варьируется от двух до четырех. Электрические машины могут быть испытаны с коэффициентом ускорения 10–15, что значительно сокращает время испытаний [16, 23].

1.8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Проектирование электрических машин включает электромагнитные, тепловые, вентиляционные, механические и другие расчеты с одновременным выбором конструкции, удовлетворяющей технологическим требованиям ее изготовления при минимальных затратах материалов, большей надежности и меньшей стоимости. Все эти требования противоречивы, и требуется расчет многих вариантов геометрии активной части и изменения конструкции машины.

Задание на курсовой проект содержит основные данные проектируемой машины, указания о режиме ее работы, конструктивном исполнении, виде защиты от окружающей среды и системе вентиляции. Кроме того, могут быть заданы дополнительные требования, например диапазон регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока, наименьшие допустимые значения кратности пускового и максимально-

Таблица 1.5. Основные разделы курсового проекта, их относительный объем

№ п/п.	Наименование разделов проектов	Объем раздела, %
1	Выбор главных размеров	5
2	Электромагнитный расчет	35
3	Разработка конструкции (выполнение чертежей общих видов в тонких линиях)	30
4	Механические расчеты	5
5	Вентиляционный расчет	5
6	Тепловой расчет	5
7	Экономический расчет	5
8	Завершение чертежей и оформление пояснительной записки	10

го моментов асинхронных двигателей и т.п. Проектируемая машина должна удовлетворять соответствующим ГОСТ.

Наименования разделов курсового проекта и их примерный объем в процентах приведены в табл. 1.5. Отдельные разделы проекта должны быть выполнены и представлены для проверки руководителю в установленные сроки.

В табл. 1.5 объем разделов курсового проекта указан ориентировочно и при индивидуальном задании корректируется в зависимости от темы проекта.

В качестве основного пособия для проектирования электрических машин общего назначения может быть использована настоящая книга. Однако для полноты проработки материала необходимо использовать также и другие источники. Так, при разработке конструкции машины следует обратиться к заводским чертежам аналогичных машин, близких по габаритам к заданной в проектном задании, каталогам и справочникам на электрические машины [23]. Примеры общей компоновки машин и конструкции их отдельных узлов и деталей подробно рассмотрены в [17], технология изготовления основных деталей и сборки — в [3], конструкция изоляции и изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах различных назначений, — в [5].

При работе над проектом следует использовать конструктивные исполнения, принятые в электрических машинах современных серий.

Расчеты машин проводят в последовательности, изложенной в соответствующих главах данной книги. Вначале выбирают главные размеры и выполняют электромагнитный расчет, в процессе которого определяют обмоточные данные и размеры машины. Электромагнитные расчеты заканчивают построением основных характеристик.

После окончания электромагнитного расчета должны быть выполнены в тонких линиях чертежи машины. В процессе конструирования проверяются выбранные ранее размерные соотношения деталей и узлов.

Вентиляционный, тепловой и механические расчеты выполняются, исходя из размеров, полученных в расчете и на чертеже. Содержание и объем этих расчетов определяются руководителем проекта в зависимости от требования технического задания.

Экономический расчет при учебном проектировании является заключительным. Его объем и методика проведения определяются кафедрой, ведущей проектирование. Вопросы экономики учитывают в течение всей работы над проектом.

К защите проекта представляются чертежи спроектированной машины и пояснительная записка.

Пояснительная записка* должна содержать окончательные варианты расчетов всех разделов проекта. Если в процессе работы выявилась необходимость изменения каких-либо первоначально принятых размеров или рассчитанных данных, потребовавшая пересчета ряда позиций, то первоначальные варианты расчета в текст пояснительной записки не включаются. К принятому окончательному варианту необходимо сделать краткое пояснение.

В тексте записки необходимые по ходу расчета пояснения и обоснования следует излагать кратко и ясно. При записи расчетов нужно обязательно привести расчетную формулу в общем виде, затем ту же формулу с заменой символов соответствующими числами и, наконец, численный результат с указанием единицы полученной величины. Результаты промежуточных вычислений могут быть опущены. Все расчеты проводят в системе СИ.

Текст пояснительной записки должен сопровождаться достаточным количеством иллюстраций — эскизов, графиков, в полной мере поясняющих принятые в расчете обозначения размеров и полученные размерные соотношения. Все рисунки должны быть выполнены с точным соблюдением масштаба, что позволяет вовремя заметить возможные ошибки в расчете. Пояснительная записка выполняется на стандартных листах писчей бумаги формата А1. Текст пишется чернилами. Обратная сторона листа не используется. Страницы записки необходимо пронумеровать, рисунки выполнить на отдельных листах чертежной или миллиметровой бумаги того же формата и сброшюровать вместе с текстом.

Графическая часть проекта обычно состоит из двух-трех листов чертежей формата А4. Она содержит чертежи общих видов машин с необходимыми для пояснения конструкции разрезами и нескольких деталей, поперечные размеры пазов с расположенными в них проводниками и изоляцией обмотки, схему обмотки и основные характеристики спроектированной машины. Объем и содержание графической части

* При оформлении пояснительной записки и графической части проекта необходимо использовать книгу Александрова К.К., Кузьминой Е.Г. Электротехнические чертежи и схемы. М.: Энергоатомиздат, 1990.

проекта корректируются в зависимости от требований технического задания и времени, отведенного в учебных планах на выполнение курсового проекта.

Контрольные вопросы

1. Что такое оптимальная электрическая машина?
2. Как Вы представляете критерии оптимизации?
3. Роль вычислительных машин при проектировании электрических машин.
4. Чем отличаются расчеты индивидуальной машины и серии электрических машин?
5. Связь электромагнитных нагрузок с габаритами машины.
6. Как выбрать конструктивное исполнение электрической машины?
7. Почему в электромашиностроении необходимы унификация и стандартизация?
8. Как учитывается надежность при проектировании электрических машин?
9. История проектирования в электромашиностроении.

Глава вторая

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ

В настоящее время улучшение показателей машин общего назначения достигается, в основном, за счет повышения качества материалов, применяемых при их изготовлении. Применяемые в электромашиностроении материалы делятся на магнитные, из которых изготавливаются магнитопроводы, проводниковые, из которых выполняются обмотки, изоляционные и конструкционные. Магнитные и проводниковые материалы принято относить к активным. Деление на активные и конструкционные материалы условно, так как часто функции материалов совмещаются. Магнитные, проводниковые, изоляционные и конструкционные материалы обеспечивают распределение электромагнитных и тепловых полей в электрической машине, при котором осуществляется оптимальное электромеханическое преобразование энергии.

2.1. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для изготовления магнитопроводов электрических машин применяются листовая электротехническая сталь, стальное литье, листовая сталь, чугун и магнитодиэлектрики.

Тонколистовая электротехническая сталь по ГОСТ 21427.0-75 разделяется на 38 марок. Она изготавливается в виде рулонов, листов и резаной ленты.

Обозначения марок стали состоят из четырех цифр. Первая обозначает класс по структурному состоянию и виду прокатки, вторая — примерное содержание кремния, третья — группу по основной нормируемой характеристике. Эти три первые цифры в обозначении марки означают тип стали, а четвертая — порядковый номер типа стали.

Сталь подразделяют по структурному состоянию и виду прокатки на 3 класса: 1 — горячекатаную изотропную, 2 — холоднокатаную изотропную, 3 — холоднокатаную анизотропную с ребровой текстурой.

По содержанию кремния сталь подразделяют на 6 групп: 0 — с содержанием кремния, равном 0,4% включительно (нелегированная); 1 — с содержанием кремния от 0,4 до 0,8%; 2 — с содержанием кремния, равным 0,8–1,8%; 3 — с 1,8–2,8%; 4 — с 2,8–3,8%; 5 — с 3,4–4,8%.

По ГОСТ 21427.0-75 химический состав стали не нормируется.

По основной нормируемой характеристике стали делятся на 5 групп: 0 — удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1,7/50}$); 1 — удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1,5/50}$); 2 — удельные потери при магнитной индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц ($p_{1,0/400}$); 6 — магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$); 7 — магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м (B_{10}).

Свойства стали зависят от содержания кремния и условий ее изготовления. Сталь с низким содержанием кремния имеет меньшую относительную магнитную проницаемость и большие магнитные потери, а также большую индукцию насыщения. Стали с высоким содержанием кремния имеют меньшие потери на вихревые токи и гистерезис и высокую относительную магнитную проницаемость в слабых и средних полях. Содержание кремния снижает плотность и повышает удельное электрическое сопротивление стали. Для стали с содержанием кремния 0,8–1,8%, плотность составляет 7800 кг/м³, удельное сопротивление $0,25 \cdot 10^{-6}$ Ом · м. Для стали с содержанием кремния 3,8–4,8 %, плотность составляет 7550 кг/м³, удельное сопротивление $0,5 \cdot 10^{-6}$ Ом · м.

В электротехнической промышленности широко применяются анизотропные холоднокатаные стали, имеющие в направлении проката более высокую проницаемость и меньшие потери в слабых полях, чем горячекатаные стали. В анизотропных сталях магнитные свойства вдоль прокатки и направления, перпендикулярном прокатке, — различные.

В последние годы созданы изотропные холоднокатаные стали с кубической текстурой, имеющие высокие магнитные качества как в направлении проката, так и в перпендикулярном направлении.

Горячекатаная изотропная тонколистовая электротехническая сталь изготавливается в виде листов следующих марок: 1211, 1212, 1213, 1311, 1312, 1313, 1411, 1412, 1413, 1511, 1512, 1513, 1514, 1521, 1561, 1562, 1571 и 1572.

По точности прокатки по толщине сталь подразделяют на сталь нормальной (Н) и повышенной (П) точности.

На электротехнические заводы листы поставляются в термически обработанном состоянии. По состоянию поверхности сталь выпускается с травленной (Т) и с нетравленной (НТ) поверхностью. Поверхность листов должна быть гладкой, без ржавчины, отслаивающей окислы, налета порошкообразных веществ, препятствующих нанесению изоляции.

Пример условного обозначения листа толщиной 0,5 мм, шириной 1000 мм, длиной 2000 мм, повышенной точности прокатки, класса неплоскостности 2, с травленной поверхностью, из стали марки 1512: лист 0,50 x 1000 x 2000-П-2-Т-1512.

На электротехническую холоднокатаную анизотропную тонколистовую сталь, изготавливаемую в виде рулонов, листов и резаной ленты, распространяется ГОСТ 21427.1-83, соответствующий стандарту СТ СЭВ 102-85. Эта сталь выпускается следующих марок: 3311, 3412, 3413, 3414, 3415, 3416, 3404, 3405 и 3406.

По точности прокатки и неплоскостности сталь подразделяется так же, как и горячекатаная, по виду покрытия: с электроизоляционным термостойким покрытием (ЭТ), с покрытием, не ухудшающим штампуемость, (М), мягкое, без электроизоляционного покрытия (БП).

Рулонную сталь изготавливают толщиной 0,28; 0,30; 0,35 и 0,50 мм и шириной 750, 860 и 1000 мм. Резаную ленту изготавливают толщиной 0,28; 0,30; 0,35; 0,50 мм, шириной 170, 180, 190, 200, 240, 250, 300, 325, 360, 400, 465 и 500 мм. Предельные отклонения по толщине стали, по ширине рулона и ленты, неплоскостность оговариваются ГОСТ. Сталь поставляется в термически обработанном состоянии. Сталь толщиной 0,28; 0,30 и 0,35 мм изготавливают с электроизоляционным термостойким покрытием, а сталь толщиной 0,50 мм — без электроизоляционного термостойкого покрытия или с покрытием, не ухудшающим штампуемость. Магнитные свойства стали приведены в приложении 1.

Тонколистовая холоднокатаная изотропная электротехническая сталь выпускается в виде рулонов, листов и резаной ленты и имеет следующие марки: 2011, 2012, 2013, 2111, 2112, 2211, 2212, 2311, 2312, 2411 и 2412 (ГОСТ 21427.2-83).

По точности прокатки, неплоскостности, коэффициенту заполнения подразделения те же, что и у анизотропной стали. По типу покрытия эти стали выпускаются с термостойким электроизоляционным покрытием (ЭТ), с нетермостойким (Э) и без покрытия (БП). Изотропную рулонную сталь изготавливают толщиной 0,35; 0,50; 0,65 мм и шириной 500, 530, 600, 670, 750, 860 и 1000 мм.

Магнитные свойства сталей характеризуют кривые намагничивания, приведенные в приложении 2. Потери в стали от вихревых токов и гистерезиса определяются удельными потерями, т.е. потерями в 1 кг стали при частоте 50 Гц и синусоидальном напряжении.

Таблица 2.1. Коэффициент заполнения пакета сталью k_c

Толщина листа, мм	Изоляция листов	
	оксидирован- ных	лакирован- ных
1	0,98	0,97
0,5	0,95	0,93
0,35	0,93	0,91
0,3	0,92	0,89
0,28	0,91	0,88

Магнитные характеристики сталей, приведенные в приложении 1, сняты на образцах на аппарате Эпштейна. Геометрия листов стали, механическая обработка искажают свойства электротехнической стали. Поэтому магнитные характеристики сталей в магнитопроводах электрических машин учитываются технологическими коэффициентами, которые определяются обычно опытным путем и учитывают конструкцию и технологию изготовления.

Для уменьшения потерь от вихревых токов листы стали изолируются лаком и выпускаются с термостойким покрытием. Изоляционные прослойки уменьшают активное сечение пакета стали, что учитывается коэффициентом заполнения пакета сталью k_c . Он характеризует отношение сечения стали (без изоляции) ко всему сечению пакета. В табл. 2.1 приведены значения k_c в зависимости от изоляции и толщины листов. Даны усредненные значения, так как k_c зависит от степени прессовки листов и длины пакетов.

Роторы короткозамкнутых асинхронных машин с заливкой пазов алюминием собираются из неизолированных листов. В этом случае k_c берется равным 0,95.

Для магнитопроводов, работающих в постоянных магнитных полях, применяются техническое железо с содержанием углерода менее 0,04%, а также углеродистые стали и чугуны.

Для изготовления небольших магнитопроводов используются магнитодиэлектрики — материалы, имеющие высокие магнитные свойства и высокое электрическое сопротивление.

Листовая сталь 1211 толщиной 0,5 или 1 мм применяется для изготовления главных полюсов машин постоянного тока. Для полюсов синхронных машин используются стали толщиной 1–2 мм и более. Это ведет к улучшению k_c , который достигает в этом случае значений 0,95–0,98.

Листовая сталь применяется для сварных станин машин постоянного тока и изготовления ободов роторов синхронных машин. Толщина ли-

стовой стали колеблется от 1,5 до 12 мм. Магнитные свойства такие же, как и у литой стали.

Стальное литье используется для изготовления станин и роторов синхронных машин. Магнитные характеристики углеродистой стали приведены в приложении 1. Кованные стали находят применение при изготовлении роторов синхронных машин и добавочных полюсов машин постоянного тока. Чугун в последнее время в электромашиностроении используется все реже из-за плохих магнитных свойств [7, 15].

2.2. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К проводниковым материалам, применяемым в электромашиностроении, относятся медь и алюминий. Серебро, имеющее удельное сопротивление, на 4% меньшее по сравнению с медью, относится к дефицитным материалам и почти не применяется при изготовлении электрических машин.

Почти все изделия из меди для электротехнической промышленности изготавливаются путем проката, прессования и волочения. Волочение применяют для производства проводов диаметром до 0,005 мм, ленты толщиной до 0,1 мм и фольги толщиной до 0,008 мм. При механических деформациях медь подвергается наклепу, который может быть устранен термообработкой.

В соответствии с ГОСТ 859-78 медь по химическому составу делится на девять марок: М1, М00к, М0ку, М0к, М00б, М0б, М1б, М1к, М1у. Цифры 0, 00, 1 определяют содержание меди, наибольшее содержание меди имеют марки М00к и М00б.

Индексы при марках имеют следующие значения: к, ку — катодная медь, б — бескислородная, у — катодная переплавленная. Примеси оказывают неблагоприятное влияние на механические и электрические свойства меди, поэтому медь с содержанием примесей выше 0,1% для изготовления проводов не используется.

Для изготовления коллекторов машин постоянного тока применяется твердотянутая медь с присадкой кадмия. Кадмий увеличивает механическую прочность меди и благоприятно сказывается на качестве пленки на поверхности пластин, улучшая коммутацию.

Высокая электрическая проводимость обеспечивает широкое применение алюминия в электротехнической промышленности. Важными свойствами алюминия являются его малая плотность, низкая температура плавления, высокая пластичность, прочная и очень тонкая оксидная пленка, защищающая алюминий от коррозии. Алюминий хорошо обрабатывается давлением, и из него получают листы, проволока, тончайшая фольга и штампованные детали. Плотность алюминия в 3,3 раза ниже, а удельное сопротивление лишь в 1,7 раза выше, чем у меди. Поэтому на единицу массы алюминий имеет вдвое более высокую проводимость, чем медь.

Алюминиевые провода имеют в обозначении букву А, изготавливаются из алюминия марки АЕ, имеющего в своем составе 99,5% чистого алюминия и 0,5% примесей железа и кремния.

Для литейных сплавов наиболее употребительны сплавы АЛ2 и АЛ9.

Для заливки роторов асинхронных двигателей применяются сплавы, технические данные которых приведены в табл. 2.2.

Сплавы, указанные в табл. 2.2, применяются при литье под давлением и центробежной заливке, сплавы АК3, АКМ4-4 и АМг7 — только при литье под давлением. Температура плавления 640–740 °С.

Латунь (сплав меди с цинком) и бронза (сплав меди с кадмием, бериллием и фосфором) применяются для изготовления короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей и демпферных обмоток синхронных машин. Они хорошо обрабатываются, имеют малую усадку и используются также для изготовления токоведущих деталей сложной формы.

В целях экономии меди контактные кольца асинхронных машин с фазным ротором выполняются из стали или чугуна. Из стали выполняют-

Таблица 2.2. Алюминиевые сплавы для заливки роторов асинхронных двигателей

Марка сплава	Удельная проводимость при 20 °С, МОм/м	Средняя линейная усадка, %	Характеристика литейно-технологических свойств
Алюминий чистый	32	1,8	Ограниченные литейные свойства и жидкотекучесть
АК3	25	-	
АКМ2-1	25	-	Чувствительны к образованию горячих трещин. Рекомендуются для заливки роторов с тонкими стержнями
АКМ4-4	19	-	
АК10	19		Высокие литейные свойства и жидкотекучесть до 800 °С. Пригодны для любых роторов, особенно с тонкими стержнями
АКМц(0-2)	15	1,3	
АКМ12-4	15	1,3	Равноценен АК10. Из-за концентрированной усадки нежелательно применять для роторов с толстыми стержнями
АМ-7	19	1,3	Низкие литейные свойства, подвержен окислению при заливке. Применяется для специальных роторов
АКЦ11-12	12	1,3	Высокие литейные свойства. Пригоден для заливки любых роторов

ся и роторы специальных асинхронных двигателей, но двигатели с массивным ротором применяются редко. В этом случае имеет место совмещение магнитных и проводниковых функций материалов.

В последнее время обосновано применение стальных проводов вместо медных в пусковых обмотках однофазных двигателей и измерительных цепях других электротехнических устройств.

При низких температурах, близких к абсолютному нулю, медь становится плохим проводником. В сверхпроводящих и криорезистивных проводах применяется сплав ниобия с титаном. Сверхпроводящая проволока имеет медное стабилизирующее покрытие, способствующее переходу сверхпроводника в нормальное состояние при резких изменениях магнитного потока. В последнее время выпускаются сверхпроводники, состоящие из транспонированных жил диаметром 1–10 мкм, число жил в медной матрице достигает сотен и тысяч [20].

Проводниковые материалы должны надежно использоваться в электрических машинах, работающих при 600 °С и выше. При температуре выше 225 °С медь начинает интенсивно окисляться, что приводит к резкому увеличению сопротивления и снижению эластичности. Чтобы защитить медную проволоку от окисления, наносится слой никеля. Биметаллическая проволока Cu–Ni для обмоточных проводов выпускается диаметром 0,1–2,5 мм.

При температуре 500–600 °С основными материалами биметаллических проводников являются серебро – никель и медь – нержавеющая сталь. Применяются также триметаллические проводники: медь – железо – никель или медь – железо – никопель [20].

2.3. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Электроизоляционные материалы, или диэлектрики, применяются в электромашиностроении для изоляции частей электрической машины, находящихся под разными потенциалами.

Диэлектрики делятся на газообразные, жидкие и твердые. В электрических машинах применяются, в основном, твердые изоляционные материалы.

Толщина междувитковой и пазовой изоляции в большой степени определяет массогабаритные показатели машин. Нагревостойкость и теплопроводность изоляции определяют допустимые температуры частей машины и выбор электромагнитных нагрузок. Изоляция должна обладать необходимыми механическими свойствами и допускать механизацию и автоматизацию технологических процессов изготовления.

Изоляция во многом определяет надежность электрической машины. Срок службы электрической машины в нормальных условиях составляет 15–20 лет и определяется, главным образом, сроком службы изоляции.

При нагреве изоляции возникают процессы, приводящие к старению изоляции, т.е. к потере изолирующих свойств и механической прочности.

Нагревостойкость является одним из важнейших факторов, определяющих условия применения изоляции. Нагревостойкость – способность электроизоляционного материала выполнять свои функции при воздействии рабочей температуры в течение времени, сравнимого с расчетным сроком нормальной эксплуатации.

Согласно стандарту МЭК для определения нагревостойкости вводится характеристика, называемая температурным индексом (ТИ). Под температурным индексом понимается температура, при которой срок службы материала равен 20 тыс. ч.

Электроизоляционные материалы, применяемые в электромашиностроении, делятся по нагревостойкости на семь классов в соответствии с предельно допустимыми для них температурами (табл. 2.3).

Указанные в табл. 2.3 температуры соответствуют самому нагретому месту изоляции при номинальном режиме. С электроизоляционными материалами данного класса допускается совместное применение материалов предшествующих классов при условии, что комплексная изоляция не будет претерпевать изменений, могущих сделать ее непригодной для длительной работы.

Ниже приводится ориентировочное распределение электроизоляционных материалов по классам нагревостойкости (температурному индексу).

К классу нагревостойкости изоляции Y (ТИ 90) относятся текстильные материалы на основе хлопка, натурального шелка, регенерированной целлюлозы, ацетилцеллюлозы и полиамидов. К этому классу относятся также целлюлозные электроизоляционные бумаги, картоны и фибра, древесина, пластические массы с органическими наполнителями.

Класс нагревостойкости изоляции A (ТИ 105) включает материалы класса нагревостойкости Y, если они пропитаны изоляционным составом или погружены в жидкие диэлектрики; ацетобутилатцеллюлозные, ацетилцеллюлозные и диацетатные пленки, пленкоэлектрокартон на основе ацетилцеллюлозной пленки; лакоткани, лакобумаги и лакочулки; изоляцию эмалированных проводов, слоистые пластики на основе целлюлозных бумаг и тканей, полиамидные литьевые смолы, асбестоцемент, пропитанный органическим составом, не вытекающим при 110 °С, древесностоистые пластики, терморепактивные компаунды на основе акриловых и метакриловых эфиров.

При производстве машин материалы класса нагревостойкости A могут пропитываться или покрываться лаками на основе натуральных смол, эфирцеллюлозными лаками и термопластичными компаундами.

В класс нагревостойкости изоляции E (ТИ 120) входят пленки и волокна из полиэтилентерефталата, материалы на основе электроизоля-

Таблица 2.3. Температурный индекс, нагревостойкость электроизоляционных материалов

Температурный индекс	Класс нагревостойкости	Температура, °С	Характеристика основных групп электроизоляционных материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости
90	У	90	Непропитанные и непогруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка, шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
105	А	105	Пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
120	Е	120	Некоторые синтетические органические пленки, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
130	В	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
155	Г	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
180	П	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
180 и выше	С	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими связующими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов

ционного картона и полиэтилентерефталатной пленки, стеклолакоткани и лакоткани на основе полиэтилентерефталатных волокон, терморезистивные синтетические смолы и компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые).

К классу нагревостойкости изоляции В (ТИ 130) относятся материалы на основе шпальной слюды, слюдопластов и слюдинитов, включая с бумажной или тканевой органической подложкой, стеклоткани и стеклолакоткучки, асбестовые волокнистые материалы, изоляции эмалированных проводов, пластмассы с неорганическим наполнителем, слоистые

пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов, термо-реактивные синтетические компаунды, асбоцемент.

В качестве пропитывающих и покровных составов при производстве для изоляции класса В применяются битумно-масляно-смоляные лаки и лаки на основе природных и синтетических смол.

Класс нагревостойкости изоляции F (ТИ 155) включает материалы на основе щипаной слюды, слюдинитов и слюдопластов без подложки или с неорганической подложкой, стекловолокнистую и асбестовую изоляцию проводов, стеклоткани и стеклолакоточки, слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов. При пропитке применяются соответствующие данному классу нагревостойкости лаки и смолы.

К классу нагревостойкости изоляции H (ТИ 180) относятся материалы на основе слюды без подложки или с неорганической подложкой, стекловолокнистая изоляция проводов, стеклолакоточки и стеклолакоточки, слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов, пластические массы с неорганическим наполнителем, асбоцемент, кремнийорганические эластомеры без подложек с неорганическими подложками, асбестовые пряжа, бумага и ткани.

При производстве материалов класса нагревостойкости H для пропитки применяются кремнийорганические лаки и смолы.

К классу нагревостойкости изоляции C относятся слюда, стекло бесщелочное и стекловолокнистые материалы, электротехническая керамика, кварц, асбоцемент, шифер электротехнический, материалы из щипаной слюды без подложки или со стекловолокнистой подложкой, микалекс, политетрафторэтилен, полиимиды.

Приведенная выше классификация электроизоляционных материалов является ориентировочной и уточняется по мере накопления опытных данных.

Влагостойкие, тропические, химостойкие, холодностойкие и коррозионно-стойкие исполнения электрических машин предъявляют дополнительные требования к изоляции.

Выбор изоляции определяется заданием на проектирование и технологией, принятой заводом-изготовителем электрической машины.

Ниже приводятся данные по наиболее применяемым электроизоляционным материалам (подробные данные приведены в [6]).

Электротехнические бумаги и картоны получают из химически обработанных волокон древесины и хлопка, предназначены они для работы на воздухе и в масле. Электроизоляционную бумагу выпускают в рулонах, а картоны — в рулонах (до толщины 0,8 мм) и в листах (при толщине свыше 1 мм). Фибра — прессованная бумага, обработанная раствором хлористого цинка, поддается всем видам механической обработки и штамповки.

К слоистым электроизоляционным материалам относятся *гетинаксы, текстолиты и стеклотекстолиты*. В качестве связующих применяют

бакелитовые и кремнийорганические смолы. В гетинаксах наполнителями являются специальные сорта бумаги, а хлопчатобумажные ткани используются в качестве наполнителей в текстолитах. Наполнителем в стеклотекстолитах являются бесщелочные стеклянные ткани. Наибольшей нагревостойкостью и хорошими электрическими характеристиками обладают стеклотекстолиты на кремнийорганических связующих.

Гетинакс и текстолит всех марок работают длительно при температурах в диапазоне $-60 \div +105^{\circ}\text{C}$, стеклотекстолит — от -60 до $+130^{\circ}\text{C}$, а стеклотекстолит марки СТК — от -60 до $+180^{\circ}\text{C}$.

Лакоткани имеют тканевую основу, пропитанную лаком или другим жидким электроизоляционным составом. Лакоткани делятся на хлопчатобумажные, шелковые, капроновые и стеклянные (стеклолакоткани). Наибольшую гибкость и толщину имеют шелковые и капроновые лакоткани. Наименьшей гибкостью обладают стеклолакоткани. Жесткие лакоткани применяют для пазовой и межслоевой изоляции. Фторопластовые стеклолакоткани негорючи, химостойки и могут работать при 250°C . Липкие лакоткани обеспечивают монолитность многослойной изоляции обмоток. Лакоткани выпускают в рулонах шириной 500—1000 мм, липкие стеклоленты — в роликах диаметром 150—175 мм и шириной 10, 15, 20, 25 и 30 мм.

Перспективными электроизоляционными материалами являются *пленочные материалы* толщиной от 10 до 200 мкм. Они обеспечивают лучший коэффициент заполнения паза, что приводит к снижению массы на единицу мощности в электрических машинах. В табл. 2.4 приведены данные пленочных электроизоляционных материалов.

Клеевые электроизоляционные материалы на основе слюды применяют в высоковольтных машинах, а также в низковольтных машинах с классом нагревостойкости изоляции Н. К этим материалам относятся *миканиты, микафолы и микаленты*.

Миканиты бывают коллекторные, прокладочные, формовочные и гибкие. Коллекторный миканит используют для изоляции между коллекторными пластинами. Прокладочный миканит — твердый листовый материал, применяемый для изготовления прокладок. Из формовочного миканита путем горячего прессования изготавливают коллекторные манжеты, корпуса, каркасы катушек и другие изделия фасонного профиля. Гибкий миканит — листовый материал, обладающий гибкостью при комнатной температуре, — используют в качестве пазовой изоляции.

Микафолы состоят из слоев листочков щипаной слюды, склеенных друг с другом и с бумагой или со стеклотканью.

Микалента — рулонный электроизоляционный материал, гибкий при комнатной температуре. Микашелк — одна из разновидностей микаленты, имеющая повышенную механическую прочность. Повышенную нагревостойкость имеют стекломикаленты. В последнее время широко применяют стеклобандажные ленты.

Таблица 2.4. Пленочные электроизоляционные материалы

Материал пленки	Плотность, кг/м ³	Нагревостойкость, °С	Относительное удлинение, %	Дополнительные данные
Полистирольные (стиропленки)	1050–1060	75–80	3,1–5,0	Растворяются в бензоле при комнатной температуре
Полиэтиленовые	920–930	65–75	250–500	Повышенная механическая прочность
Фторопласт-4	2100–2300	250	30–100	Не растворяется и не горит
Лавсан	1300–1400	120–130	70–100	Обладает большим сопротивлением надрыву
Фторопласт-3	2100–2400	100–120	40–80	Не горит. Растворяется в неполярных растворителях (бензин, четыреххлористый углерод и т.п.) при 100 °С
Поливинилхлоридные	1400	65–75	10–120	Гибкие, стойкие к маслам, растворителям, озону
Триацетатцеллюлозные	1250	120	12–15	Повышенное влагопоглощение
Полиамидные (капрон)	1150	105	350–500	Большое сопротивление надрыву
Полиамидные	1420	220	70–80	Стойкость к ионизирующим излучениям

Микалекс — неорганическая пластмасса на основе молотой слюды и легкоплавкого стекла, стойкая к дуге и имеющая хорошие механические свойства, выпускается в виде листов, пластин и прутков, применяется в электроизоляционных конструктивных механически нагруженных деталях (траверсы, распорки, щитки и т.д.).

Слюдаиниты и слюдопласты широко применяются в качестве изоляционных материалов. Номенклатура слюдаинитовых электроизоляционных материалов та же, что и материалов на основе шпательной слюды.

В слюдаинитах основой являются слюдаинитовые бумаги, которые получают из отходов слюды при равномерном ее нагреве до 700–800 °С с последующей химической обработкой. Из слюдаинитовых бумаг изготавливаются слюдаинитовые ленты, гибкие слюдаиниты, формовочный и коллекторный слюдаиниты.

Слюдаинитовые материалы изготавливаются из листов, полученных из расщепленной слюды путем многократного прокатывания чешуек между вальками. В процессе изготовления слюдопластовых листов чешуйки срываются, образуя более крупные чешуйки слюды, чем в слюдаините.

Слюдопластовые материалы выпускаются в том же ассортименте, что и слюдаиниты.

Для пропитки обмоток электрических машин широко применяют пропиточные *компаунды и лаки*, которые обеспечивают цементацию витков, увеличивают коэффициент теплопроводности и повышают влагостойкость обмоток.

Покровные лаки обеспечивают влагостойкость, маслостойкость, защиту от агрессивных веществ обмоток и других частей электрических машин. По способу сушки лаки делятся на лаки печной и воздушной сушки. Первые отвердевают при температуре 80–180 °С, а вторые высыхают при комнатной температуре.

В электромашиностроении в качестве изоляционных материалов применяются материалы на основе натурального и искусственного каучуков. В зависимости от содержания серы получают мягкую резину (1–3% серы) и твердую резину – эбонит (30–35% серы).

Хорошими электроизоляционными свойствами обладают *керамические материалы*. К неорганическим керамическим материалам относится фарфор, который применяется при изготовлении высоковольтных выводов электрических машин.

В качестве изоляции используются диэлектрические пленки. Наибольшее распространение получили оксидные пленки из алюминия.

В качестве изоляционных и конструктивных материалов в электрических машинах широко применяются *пластмассы*. Многие пластмассы имеют высокую прочность и хорошие электроизоляционные свойства. При прессовании изделий из порошка можно получить электроизоляционные изделия сложной формы при сравнительно низкой трудоемкости [6, 7].

2.4. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

Медные и алюминиевые обмоточные провода выпускают круглых и прямоугольных сечений. Изоляция проводов определяет принадлежность проводов к тому или иному классу нагревостойкости (температурному индексу –ТИ).

Круглые медные эмалированные провода широко применяют в электромашиностроении. Они имеют небольшую толщину изоляции, в 1,5–2,5 раза меньшую, чем провода, покрытые эмалью и хлопчатобумажной или шелковой тканью. Это повышает теплопроводность и улучшает коэффициент заполнения паза.

Прямоугольные провода применяются в электрических машинах мощностью свыше 100 кВт и дают лучшее заполнение прямоугольных пазов.

Прямоугольные провода имеют в обозначении букву П. Ассортимент и размеры прямоугольных проводов приведены в приложении 3.

Свойства изоляции проводов определяются электроизоляционными лаками. Эмали и лаки могут иметь синтетическую или масляно-смоляную основу. Более 95% всех эмалированных проводов изготавливается с

применением синтетических лаков, так как лаки на масляно-смоляной основе требуют при изготовлении растительные масла.

Для проводов класса нагревостойкости А (ТИ 105) применяются покрытия на основе поливинилацеталевых лаков.

Полиуретановые лаки применяются для эмалированных проводов класса нагревостойкости Е (ТИ 120).

Для производства эмалированных проводов классов нагревостойкости В, F и Н (ТИ 130, 155 и 180) используются лаки на полиэфирной, полиэфиримидной, полиэфирдианурагимидной и полиэфирамидной основах. Эта группа лаков является в настоящее время основной при производстве эмалированных проводов [6, 20].

В табл. 2.5 приведены основные данные медных эмалированных проводов, а в табл. 2.6 — их ассортимент и размеры.

Основными типами высокопрочных эмалированных проводов являются провода ПЭВ-1 и ПЭВ-2, эмалированные винифлексовой изоляцией, и провода повышенной нагревостойкости ПЭТВ.

Круглые медные провода марок ПЭТВ-1 и ПЭТВ-2 являются основными проводами класса нагревостойкости В (ТИ 130).

Медные провода прямоугольного сечения ПЭТВП выпускаются с сечениями 1,4—24,3 мм².

Для механизированной намотки электродвигателей единых серий применяются провода марки ПЭТВМ, которые имеют большую толщину изоляции и лучшие механические свойства. Провода ПЭТВМ выпускаются в диапазоне диаметров 0,25—1,40 мм. Несмотря на увеличение толщины изоляции в среднем на 0,01—0,02 мм по обе стороны, провода марки ПЭТВМ имеют такую же эластичность, что и провода ПЭТВ.

К проводам класса нагревостойкости F (ТИ 155) относятся провода марок ПЭТ-155, ПЭТП-155, ПЭТМ.

По своим электроизоляционным свойствам провода марки ПЭТ идентичны проводам ПЭТВ, но имеют повышенную стойкость к действию теплового удара.

Провода ПЭТП имеют диапазон сечений 1,6—11,2 мм².

Провода для механизированной намотки ПЭТМ выпускаются в диапазоне диаметров 0,8—1,32 мм.

Для эксплуатации в среде хладагona применяются провода ПЭФ-155, отличающиеся от проводов ПЭТМ лишь тем, что их изоляция удовлетворяет специальным требованиям работы в двигателях холодильников.

Класс нагревостойкости С (ТИ 180 и выше) имеют медные круглые провода ПЭТ-200 и медные прямоугольные ПЭТП-200. Прямоугольные провода выпускаются в диапазоне сечений от 1,6 до 11,2 мм². Эти провода имеют высокую механическую прочность, выдерживают тепловые удары при 280 °С.

Для длительных рабочих температур 220—240 °С изготавливаются медные провода ПЭТ-имид и медные никелированные марки ПИЭТ-имид, которые имеют диаметры 0,1—2,5 мм.

Таблица 2.5. Нагревостойкость, температурный индекс и конструктивные данные основных типов медных эмалированных проводов

Марка провода	Температурный индекс	Класс нагревостойкости	Тип эмалевого изоляции	Номинальные размеры токопроводящей жилы, мм	Двухсторонняя толщина изоляции, мм
ПЭЛ	105	A	Эмаль на масляно-смоляной основе	0,02–2,50	0,010–0,02
ПЭВ-1	105	A	Высокопрочная эмаль на поливинилацетатной основе	0,02–2,50	0,01–0,02 0,02–0,085
ПЭВ-2	105	A	То же с утолщенной изоляцией	0,02–2,50	0,025–0,090
ПЭМ-1	105	A	Высокопрочная эмаль на поливинилацетатной (поливинилформальевой) основе	0,02–2,50	0,02–0,08
ПЭМ-2	105	A	То же с утолщенной изоляцией	0,06–2,50 0,06–0,45	0,025–0,085 0,033–0,085
ПЭВТЛ-1	120	E	Высокопрочная эмаль на полиуретановой основе	0,05–1,60	0,015–0,07
ПЭВТЛ-2	120	E	То же с утолщенной изоляцией	0,05–1,60	0,02–0,08
ПЭВТЛК	120	E	Двойная эмаль на основе полиуретановых и полиамидных смол	0,05–1,60	0,03–0,05
ПЭТВ-1	130	B	Высокопрочная эмаль на полиэфирной основе (лак ПЭ-943)	0,063–2,50	0,025–0,09
ПЭТВ-2	130	B	То же (лак ПЭ-939)	0,063–2,50	0,025–0,09
ПЭТ-155 и ПЭТВ	155	F	Высокопрочная эмаль на полиэфиримидной основе	0,06–2,44	0,025–0,09
ПЭТ-200	200	C	Полиамидные лаки, обеспечивающие высокие механическую прочность и нагревостойкость	0,05–2,50	0,025–0,06

Прямоугольные никелированные медные провода ПИЭТП-имид выпускаются с сечениями от 1,4 до 5,1 мм².

Толщина полиимидной изоляции этих проводов несколько ниже, чем у обычных эмалированных проводов.

Для специальных применений изготавливаются провода эмалированные с двойной изоляцией, провода с гибкой керамической и стеклоэмалевой изоляцией, провода с волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией, провода со стекловолокнистой дельта-асбестовой и стеклянной изоля-

**Таблица 2.6. Ассортимент и расчетные размеры
медных эмалированных проводов**

Номи- нальный диаметр голой прово- локи, мм	Расчетный наружный диаметр, мм			Номи- нальный диаметр голой прово- локи, мм	Расчетный наружный диаметр, мм		
	ПЭЛ	ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭЛР-1, ПЭВТЛ-1	ПЭТ-200, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-2, ПНЭТ, ПЭТВ		ПЭЛ	ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭЛР-1, ПЭВТЛ-1	ПЭТ-200, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-2, ПНЭТ, ПЭТВ
0,02	0,03	0,03	—	0,425	0,460	0,455	0,465
0,025	0,035	0,035	—	0,45	0,485	0,48	0,49
0,032	0,04	0,042	—	0,475	0,510	0,505	0,515
0,04	0,05	0,052	—	0,50	0,54	0,545	0,555
0,05	0,062	0,07	—	0,53	0,57	0,575	0,585
0,06	0,072	0,083	0,087	0,56	0,60	0,605	0,615
0,07	0,082	0,093	0,097	0,60	0,64	0,645	0,655
0,08	0,092	0,103	0,107	0,63	0,67	0,675	0,685
0,09	0,102	0,113	0,117	0,67	0,71	0,715	0,730
0,10	0,115	0,123	0,127	0,71	0,76	0,755	0,770
0,112	0,135	0,143	0,147	0,75	0,80	0,80	0,815
0,125	0,140	0,148	0,153	0,85	0,90	0,90	0,915
0,132	0,147	0,155	0,159	0,90	0,95	0,95	0,965
0,14	0,155	0,163	0,167	0,95	1,00	1,00	1,015
0,15	0,168	0,177	0,180	1,00	1,06	1,07	1,08
0,16	0,178	0,187	0,190	1,06	1,12	1,13	1,14
0,17	0,188	0,197	0,200	1,12	1,18	1,19	1,20
0,18	0,198	0,207	0,210	1,18	1,24	1,25	1,26
0,19	0,208	0,217	0,220	1,25	1,31	1,32	1,33
0,20	0,222	0,227	0,230	1,32	1,38	1,39	1,40
0,212	0,234	0,239	0,242	1,40	1,465	1,47	1,48
0,224	0,246	0,251	0,254	1,50	1,565	1,57	1,58
0,236	0,258	0,266	0,271	1,60	1,665	1,67	1,68
0,25	0,272	0,28	0,285	1,70	1,765	1,77	1,78
0,265	0,291	0,295	0,30	1,80	1,865	1,875	1,88
0,28	0,306	0,31	0,315	1,90	1,965	1,975	1,98
0,30	0,326	0,33	0,335	2,00	2,065	2,075	2,08
0,315	0,345	0,345	0,350	2,12	2,185	2,205	2,21
0,335	0,365	0,365	0,370	2,24	2,305	2,325	2,33
0,355	0,385	0,385	0,395	2,36	2,425	2,445	2,45
0,375	0,405	0,405	0,415	2,50	2,565	2,585	2,59
0,40	0,435	0,43	0,44				

цией, а также провода с пленочной и пластмассовой изоляцией [6, 20].

Эмалированные провода с двойной изоляцией ПЭВД и ПЭВДД имеют класс нагревостойкости А (ТИ 105) и выпускаются диаметром 0,06–0,45 мм. При нагревании дополнительный слой изоляции расплавляется и склеивает витки катушек без пропитывающих лаков.

Провода ПЭВТР имеют дополнительный термореактивный слой, повышающий допустимые температуры. Провод ПЭВТЛК имеет дополнительное покрытие, повышающее механическую прочность.

Провода с гибкой керамической изоляцией ПЭЖБ допускают длительную работу при 400 °С и в течение 2000 ч при 500 °С.

Провода с волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией марок ПБД и АПБД имеют класс нагревостойкости А (ТИ 105). Изоляция — эмаль и хлопчатобумажная пряжа.

С двойной изоляцией из натурального шелка выпускаются провода ПШД, ПШДКМ, ПШДКТ. Выпускаются также провода с двойной лавсановой изоляцией марки ПЛД.

Медные провода с эмалево-волокнистой изоляцией марок ПЭШО, ПЭЛО и ПЭБО имеют эмалевую изоляцию и шелковое или лавсановое полотно.

Провода со стекловолокнистой изоляцией ПСД-Л, ПСДТ, ПСДТ-Л, АПСД имеют классы нагревостойкости F и H (ТИ 155 и 180). Круглые провода марок ПСД и ПСДК выпускаются диаметром от 0,5 до 5 мм. Диапазон сечений проводов прямоугольного сечения от 2 до 5 мм².

Для изготовления обмоток с внутренним охлаждением применяются провода ПСДП (полый проводник прямоугольного и квадратного сечений) с площадью сечения от 2 до 53 мм². Класс нагревостойкости этих проводов F (ТИ 155).

Провода марки ПОЖ предназначены для длительной работы при 300 °С в течение ограниченного времени при 500–600 °С. Такие провода имеют диаметры от 0,315 до 3 мм, прямоугольные — от 1,9 до 20 мм².

Для изготовления двигателей электроподвижного состава применяются круглые и прямоугольные провода марки ПЭТВСД, имеющие эмалевую и стеклянную изоляцию. Диаметр круглых проводов 0,85–2,5 мм. Сечение прямоугольных проводов 2,5–25,2 мм². Класс нагревостойкости F (ТИ 155).

Для обмоток высоковольтных машин используются прямоугольные провода с комбинированной пленочно-волокнистой изоляцией марки ППЛБО. Изоляция включает три слоя лавсановой пленки и один слой хлопчатобумажной пряжи. Диапазон сечений от 3 до 80 мм². Класс нагревостойкости А (ТИ 105). Среднее пробивное напряжение 9 кВ.

Для изготовления протяжных обмоток погружных маслозаполненных электродвигателей переменного тока с номинальным напряжением 1000–2000 В, работающих в пластовой жидкости, применяются медные провода марок ПЭТВПДЛ-3 и ПЭТВПДЛ-4. Изоляция состоит из слоя нагревостойкой высокопрочной эмали и 3 или 4 слоев лавсановой плен-

ки. Провода выпускаются диаметрами 1,7–2,8 мм, толщиной изоляции 0,55–0,68 мм. Класс нагревостойкости Е (ТИ 120).

Нагревостойкие обмоточные провода для погружных двигателей ППФ, ППФИ, ППИ имеют изоляцию из ленточного фторопласта-4 и полиимидно-фторопластовой пленки.

Обмоточные провода марки ПЭВВГ предназначены для изготовления обмоток, укладываемых в закрытые пазы протяжкой, и применяются для двигателей напряжением 380 В при рабочей температуре до +70 °С.

Провода ПВДП-1 и ПВДП-2 имеют рабочее напряжение 380 и 660 В. Изоляция двухслойная из полиэтилена.

Обмоточные провода с дельта-асбестовой изоляцией ПДА имеют класс нагревостойкости F (ТИ 155) и выпускаются диаметрами 1,81–4,8 мм.

Провода ПДА постепенно заменяются проводами со стекловолоконистой изоляцией.

Сверхпроводящие и криопроводящие обмоточные провода выпускаются в однопроволочном и многопроволочном исполнениях из легкодеформируемых сплавов ниобий–титан, ниобий–цирконий–титан, ниобий–цирконий. Проволоки заключены в медную матрицу, которая покрывается эмалево-волоконистой или пленочной изоляцией. Созданные многопроволочные провода из сплава НТ-50 допускают ток 120 кА при индукции 6 Тл [20].

Для пайки проводников применяют припои. Припои делятся на мягкие и твердые. Наибольшее применение получили оловянно-свинцовые припои ПОС-90, ПОС-61, ПОС-50, ПОС-40, ПОС-30, ПОС-18. Цифры обозначают процентное содержание олова.

Мягкие припои заменяются медно-фосфористыми припоями марок ПМФ-7 и ПМФ-9. Цифрами обозначается содержание фосфора.

Серебряные припои ПСр-71 (71% серебра, 28% меди и 1% фосфора) обеспечивают прочность сплавов, превосходящую прочность меди. Серебряные припои применяют в специальных электрических машинах, работающих в тяжелых условиях эксплуатации.

От правильного выбора обмоточных проводов во многом зависит срок службы электрической машины. Даже если превышения температур при различных сортах провода близки друг к другу, срок службы может отличаться в несколько раз.

При изготовлении обмоток большое значение имеет выбор натяжения и радиусов изгиба провода. Пропитывающие лаки и компаунды не должны оказывать вредного воздействия на изоляцию проводов.

Наиболее распространенные пропитывающие лаки для эмалированных проводов – глифталемасляные (ГФ-95, МЛ-92), амидный (АФ-17 и ФЛ-98) и глицеридомасляный (марки КФ-95). Наиболее влагостойким пропитывающим лаком класса нагревостойкости В (ТИ 130) является лак ПЭ-933.

Для цементации обмоток наиболее распространенным компаундом является КП, имеющий класс нагревостойкости В (ТИ 130).

После обмотки сечение провода изменяется, поэтому сопротивление фазы может изменяться от максимального до минимального значения в зависимости от технологии изготовления и допусков на изготовление проволоки.

2.5. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для изготовления частей машины, несущих механические нагрузки и обеспечивающих соединение машины в единое целое, используют конструкционные материалы. Они делятся на три группы: черные, цветные металлы и пластмассы.

К черным металлам относятся литая сталь, серый и ковкий чугун, различные сорта и профили прокатных сталей. Литую сталь в электрических машинах применяют для изготовления частей машины, выполняющих одновременно роль конструкционных частей и части магнитопровода, где замыкается постоянный поток. В машинах постоянного тока — это станина, основные и добавочные полюсы; в неявнополюсных синхронных машинах — бочка ротора, а в явнополюсных — полюсы индуктора и индуктор (обод ротора).

Литая сталь применяется также для изготовления деталей с высокими механическими напряжениями — втулок коллектора, подшипниковых щитов тяговых и взрывозащищенных машин. Изготовление деталей из литья связано с большой трудоемкостью, поэтому там, где это допустимо, литую сталь заменяют сварными деталями из листовой стали. В электромашиностроении применяют литую сталь марок 20Л, 35Л, 45Л (ГОСТ 977-88).

Серый чугун марок СЧ12-28, СЧ15-32, СЧ18-36, СЧ21-20, СЧ28-48 (ГОСТ 1412-85) применяют для изготовления станин асинхронных и синхронных машин, подшипниковых щитов.

Из ковкого чугуна (ГОСТ 1215-79) путем отливки изготавливают станины, втулки, подшипниковые щиты, нажимные шайбы, маховики, шкивы и полумуфты.

Преимущество ковкого чугуна по сравнению с серым заключается в пластичности и высокой износостойкости.

В электромашиностроении применяют круглую, листовую, шестигранную и квадратную прокатную сталь.

Сталь круглую (ГОСТ 2590-88 и ГОСТ 7417-75) используют для изготовления валов, втулок, шестерен и других деталей.

Сталь шестигранную (ГОСТ 8560-78) применяют для изготовления деталей, имеющих шестигранную часть: болтов, гаек и других деталей. Крупные болты изготавливают из круглой стали с высадкой шестигранной головки.

Сталь квадратная (ГОСТ 2591-88 и ГОСТ 8559-75) идет на изготовление стержней, пальцев щеткодержателей и других деталей.

Сталь листовую применяют для изготовления листов полюсов машин постоянного и переменного тока, фундаментных плит, стояков подшипников и многих других деталей (диффузоров, распорок и т.п.).

Жесткую белую холоднокатаную горячего лужения и ленточную толщиной 0,18–0,5 мм, покрытую с обеих сторон слоем олова, применяют при изготовлении бандажей, скрепок, табличек. Она хорошо штампруется и устойчива против коррозии.

Углеродистую стальную холоднокатаную проволоку используют при изготовлении пружин щеткодержателей, запоров крышек и других деталей.

Проволоку стальную луженую бандажную выпускают немагнитной и магнитной и применяют для изготовления бандажей обмоток асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока. Диаметр проволоки 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0 мм.

Детали из алюминиевого литья легче чугунных и стальных, но ненадежность резьбы вызывает необходимость армирования втулками.

Алюминиевые литые сплавы применяются для изготовления корпусов, подшипниковых щитов, вентиляторов и других деталей электрических машин. АЛ2 — алюминиево-кремнистый сплав, используется для изготовления деталей сложной формы и требующих высокой герметичности; АЛ11 — алюминиево-кремнисто-цинковый сплав, применяется для изготовления крупных деталей сложной формы, несущих большие статические нагрузки. Детали из этих сплавов отливаются в кокиль, под давлением и в земляные формы.

Литые сплавы с содержанием меди — латуни — используются для отливки щеткодержателей и других токоведущих деталей. ЛС59-1 — латунь свинцовистая. ЛС80-3Л — латунь кремнистая. Детали из этих сплавов отливаются центробежным способом и по выплавляемым моделям.

В электромашиностроении находит большое применение сортовой прокат цветных металлов. Это латуни Л63 и латунь свинцовистая ЛС59-1. Поставляются они в виде проволоки, лент, листов и прутков круглого, квадратного и шестигранного сечения, используются для изготовления деталей ковкой, штамповкой и механической обработкой.

Бронзу БрОЦС — оловянисто-цинково-свинцовую — применяют для деталей, работающих на трение (втулки, вкладыши, червячные колеса).

Баббиты БКА, БК2, Б-89, Б-83, Б-16, Б-6, БН и БТ используются для заливки втулок, сегментов и вкладышей подшипников скольжения.

В качестве конструкционных материалов в электрических машинах достаточно широко применяются пластмассы. При нагреве пластмассы под влиянием давления приобретают очертания пресс-формы. Пресс-порошки в определенных соотношениях составляют основные составляющие пластмассы. В большинстве случаев пластмассы состоят из двух компонентов: связующего и наполнителя. В качестве связующего используется органический полимер, обладающий способностью деформиро-

ваться, в качестве наполнителя — опилки, асбестовое и стеклянное волокно, бумага, ткани, кварцевый песок и др. Наполнители существенно снижают стоимость пластмассы [6].

Технология изготовления пластмасс определяется связующим веществом. Большинство пластмасс требует при изготовлении горячей прессовки. Эти пластмассы делятся на термопластичные (термопласты) и термореактивные (реактопласты). К термопластам относятся пластмассы на основе поливиниловых и полиамидных смол, эфиров целлюлозы и др., к реактопластам — пластмассы на основе фенолформальдегидных, карбамидных и других термореактивных смол.

Из термореактивных пластмасс изготавливают колодки зажимов, изоляционные втулки и другие детали. Широко применяются опрессованные детали — щеточные пальцы, траверсы и другие детали. В двигателях серии АИ из пластмассы на малых высотах оси вращения изготавливаются вентиляторы.

Контрольные вопросы

1. Как делятся материалы, применяемые в электромашиностроении?
2. Назовите основные магнитные материалы для изготовления магнитопроводов и обмоток электрических машин.
3. Какие конструктивные материалы применяются в электромашиностроении?
4. Основные изоляционные материалы, применяемые в электромашиностроении.
5. От чего зависят коэффициенты заполнения паза и пакета магнитопровода статором?
6. Температурный индекс электроизоляционных материалов и влияние его на габариты электрической машины.
7. Назовите основные обмоточные провода, применяемые в электромашиностроении.
8. Как влияют материалы, из которых изготавливаются электрические машины, на их габариты, стоимость и надежность?

Глава третья

КОНСТРУКЦИЯ И СХЕМЫ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

3.1. ТИПЫ ОБМОТОК И ИХ ИЗОЛЯЦИЯ

В современных электрических машинах наибольшее распространение получили цилиндрические разноименнополюсные (барабанные) обмотки. Проводники таких обмоток располагаются вдоль воздушного зазора машины и не охватывают магнитопровода статора и ротора. Другие типы обмоток встречаются только в некоторых специальных типах электрических машин.

Обмотки могут быть сосредоточенными или распределенными. В сосредоточенных обмотках витки, образующие полюс, объединены в одну,

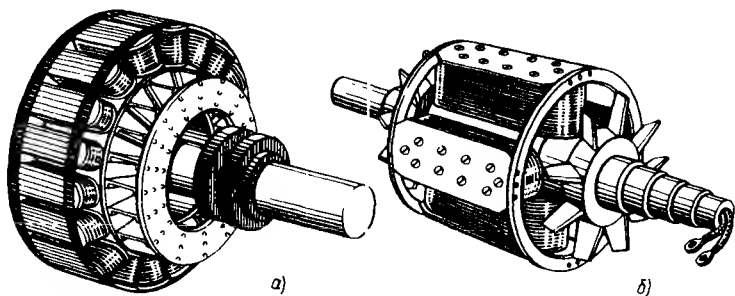


Рис. 3.1. Роторы синхронных машин с явно выраженными полюсами:
 а — многополюсный; б — четырехполюсный

как правило, многovitковую катушку, которая насаживается на ферромагнитный сердечник. Полюс, образованный катушкой и сердечником, называют явно выраженным или явным.

Сосредоточенные обмотки полюсов машин постоянного и переменного тока одинаковы по схемам соединений и различаются между собой лишь особенностями конструктивного исполнения и способами крепления катушек. Обмотки возбуждения почти всех машин постоянного тока выполняют сосредоточенными. В машинах переменного тока сосредоточенными выполняют обмотки возбуждения синхронных машин с частотой вращения не более 1500 об/мин. Такие машины называют машинами с явно выраженными полюсами на роторе или машинами с явнополюсными роторами (рис. 3.1).

Распределенные обмотки состоят из катушек с относительно небольшим числом витков каждая (в машинах большой мощности — до одного-двух витков в катушке). Катушки размещают равномерно по всей длине окружности воздушного зазора в пазах статора или ротора (рис. 3.2). Соединенные между собой по определенной схеме катушки образуют так называемые неявно выраженные полюсы машины.

Распределенные обмотки приняты в статорах и фазных роторах асинхронных машин, в статорах синхронных машин, якорях машин постоянного тока и в роторах синхронных машин с частотой вращения 3000 об/мин (в неявнополюсных роторах). В ряде конструкций машин постоянного тока обмотки возбуждения также выполняют распределенными.

Катушки распределенной обмотки (рис. 3.3) наматывают обмоточным проводом. Прямолинейные части витков, располагающиеся в пазах магнитопровода, называют пазовыми частями; криволинейные, которые соединяют пазовые между собой, — лобовыми частями витка. Аналогичные названия — пазовые и лобовые части — имеют соответствующие части катушки. Участки изгибов лобовых частей называют головками

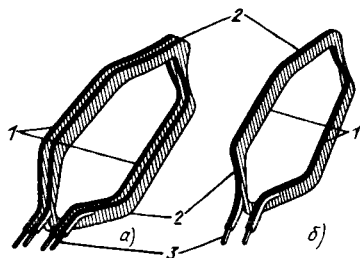
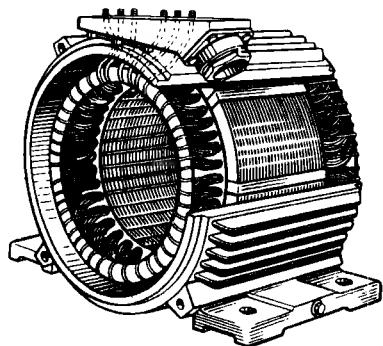


Рис. 3.2. Статор машины переменного тока с распределенной обмоткой

Рис. 3.3. Катушки распределенной обмотки из прямоугольного провода:

а — подразделенная; *б* — цельная; 1 — пазовые части; 2 — лобовые части; 3 — выводные концы

катушек, начала и конец обмоточного провода, которым намотана катушка, — выводными концами катушки.

Стороны катушек распределенных обмоток могут занимать либо целый паз, либо только половину (рис. 3.4). В первом случае обмотку называют однослойной, во втором — двухслойной, так как стороны катушек располагают в пазах в два слоя: одна в нижней половине паза — нижний слой, вторая в верхней половине — верхний слой.

Некоторые типы обмоток образуются не из катушек, а из стержней — стержневая обмотка (рис. 3.5). Каждый стержень представляет собой как бы катушку, разрезанную пополам по лобовым частям, и состоит из одной пазовой и двух половин разных лобовых частей. Витки стержневой обмотки образуются после укладки обмотки в пазы и соединения головок стержней друг с другом. В расчетах и схемах стержневая обмотка рассматривается как катушечная с одним витком в катушке.

По направлению отгиба лобовых частей катушек или стержней, который определяет последовательность их соединений между собой, различают петлевые и волновые обмотки (рис. 3.5).

Почти все обмотки электрических машин наматывают изолированным обмоточным проводом. Значительно реже для обмоток используют неизолированную прямоугольную проволоку или медные шины, на которые изоляцию наносят в процессе изготовления катушек. Лишь короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей и демпферные или пусковые обмотки синхронных машин не имеют изоляции. Стержни этих обмоток устанавливают в неизолированные пазы магнитопровода, а в большинстве асинхронных двигателей мощностью до 300–400 кВт выполняют заливкой в пазы алюминия или его сплавов.

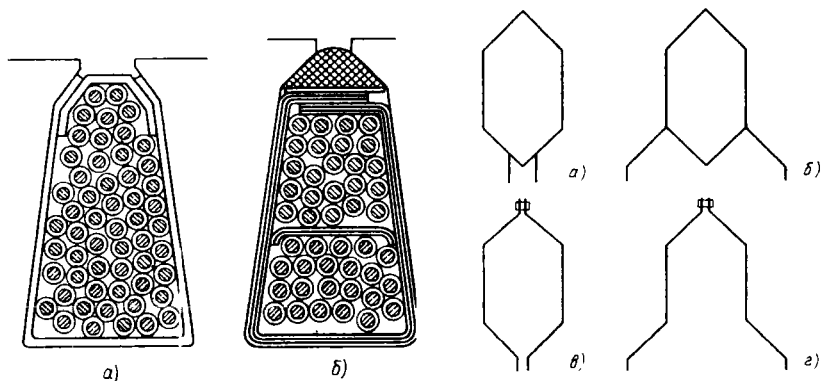


Рис. 3.4. Поперечное сечение полузакрытых пазов статора с обмоткой из круглого провода:

а – машин малой мощности, однослойная обмотка; *б* – машин средней мощности, двухслойная обмотка

Рис. 3.5. Схематическое изображение элементов катушечных обмоток:

а – петлевой; *б* – волновой; *в* – стержневой; *г* – петлевой; *д* – волновой

К изоляции электрических машин предъявляют целый ряд требований, целью которых является обеспечение надежной работы машины на протяжении всего расчетного срока ее эксплуатации. Изоляция, прежде всего, должна иметь достаточную электрическую прочность для предотвращения возможного замыкания витков обмотки на металлические части машины или между собой. Для обеспечения этого требования изоляция должна обладать хорошей теплопроводностью, так как иначе тепло, выделяемое в проводниках обмотки, нагреет ее выше допустимых пределов и электрическая прочность изоляции снижается. Кроме того, изоляция обмоток не должна заметно ухудшать свои электрические свойства под воздействием механических усилий, которым она подвергается в процессе укладки обмотки в пазы, и при работе машины, под воздействием влаги, паров масел и различных газов, которые может содержать окружающий машину воздух. Эти требования определяют необходимые для изоляции термическую и механическую прочность, влаго- и маслостойкость и т.п.

По своему функциональному назначению изоляция обмоток подразделяется на корпусную – наружную изоляцию катушек, изолирующую их от стенок пазов в сердечниках (пазовая изоляция) и от других металлических частей машины (изоляция лобовых частей катушек), междуфазовую, изолирующую катушки каждой фазы обмотки от других фаз, витковую, изолирующую каждый виток катушки от других витков, проводниковую – изоляцию каждого из проводников обмотки. Каждый

из видов изоляции имеет свою, специфическую конструкцию, и к ним предъявляются различные требования.

В общем случае толщина и конструкция всех видов изоляции определяются ее функциональным назначением, уровнем номинального напряжения машины, ее типом и условиями эксплуатации, для которых предназначена данная машина.

В наиболее тяжелых условиях при эксплуатации находится корпусная изоляция пазовых частей катушек обмотки. Ограниченные размеры паза приводят к необходимости выполнения пазовой изоляции в виде тонкого и механически прочного слоя, отвечающего всем перечисленным выше требованиям к изоляции электрических машин, т.е. электрической и механической прочности, теплопроводности и др. Современные электроизоляционные материалы позволяют выполнить пазовую изоляцию машин с номинальным напряжением до 660 В толщиной, не превышающей нескольких десятых долей миллиметра на сторону, а машин высокого номинального напряжения толщиной, не превышающей нескольких миллиметров на сторону.

Корпусная изоляция по своей конструкции может быть непрерывной или гильзовой. Непрерывную изоляцию образуют обертыванием проводников катушки по всей их длине лентой изоляционного материала, например микалентой, стекломикалентой или стеклослюдинитовой лентой. Ленту обычно наносят вполперекроя (вполнахлеста) в несколько слоев, число которых зависит от номинального напряжения машины. В большинстве конструкций после наложения ленты изоляцию пропитывают изолирующими составами — лаками или компаундами для создания монолитного изолирующего слоя и увеличения ее теплопроводности и механической прочности.

Гильзовую изоляцию образуют обертыванием прямолинейных пазовых частей катушек широким листовым изоляционным материалом с последующей горячей обкаткой наложенных слоев (мягкая гильза) или горячей обкаткой, опрессовкой и запечкой (твердая гильза). На изогнутые лобовые части катушек с гильзовой изоляцией наносят непрерывную ленточную изоляцию.

Непрерывную и гильзовую изоляцию применяют для обмоток всех машин напряжением 3000 В и выше, в обмотках якорей машин постоянного тока большой мощности, стержневых волновых обмотках фазных роторов асинхронных двигателей, а также в машинах специального, например влагостойкого, исполнения при любом номинальном напряжении.

Пазовые части обмотки машин напряжением до 660 В изолируют коробами из одного или двух слоев изоляционного материала — пленко-синтокартона, электронита, имидофлекса и т.п. Пазовые короба устанавливают в пазы до укладки обмотки. Они не могут служить надежной корпусной изоляцией для обмоток машин более высокого напряжения.

Примеры выполнения изоляции обмоток приведены при описании конкретных конструкций обмоток.

3.2. КОНСТРУКЦИЯ И ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТОК СТАТОРОВ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Обмотки электрической машины в зависимости от ее мощности, номинального напряжения и условий, для работы в которых она предназначена, могут быть выполнены из круглого или прямоугольного обмоточного провода. Это определяет также форму пазов магнитопровода машины и конструкцию самих обмоток и изоляции [5].

Обмотки из круглого провода. В машинах с номинальным напряжением до 660 В и мощностью до 100 кВт обмотки выполняют из круглого обмоточного провода и укладывают в трапециевидные полузакрытые пазы (см. рис. 3.5). При ручной укладке обмотки проводники предварительно намотанных заготовок катушек укладывают в полузакрытые пазы магнитопровода, поочередно пропуская их через шлиц паза, — "высыпают". Поэтому обмотку такого типа часто называют сыпной.

При машинной укладке в зависимости от типа обмоточных станков каждый из витков обмотки либо укладывают непосредственно в паз без предварительной намотки заготовок, либо наматывают заготовки нескольких катушек, а затем втягивают их с торца магнитопровода в нужные пазы. Эти операции осуществляют на автоматических или полуавтоматических обмоточных станках.

Наибольший диаметр провода, применяемый для сыпных обмоток, не превышает 1,8 мм, так как провода большего диаметра имеют слишком большую жесткость и плохо уплотняются в пазах во время укладки. Нужное сечение эффективного проводника обеспечивается выполнением обмотки из нескольких элементарных проводников.

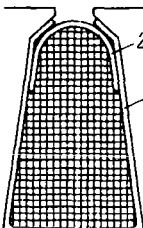
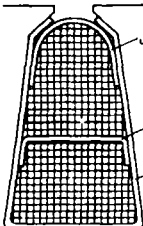
При проектировании машин для уменьшения необходимого числа элементарных проводников выбирают обмотку с несколькими параллельными ветвями [4].

Примеры конструкции изоляции обмотки из круглого провода приведены в табл. 3.1 и 3.2. Пазовая часть обмотки изолирована коробами из пленкослюдопласта или из двух слоев различных материалов, например пленкосинтокартона и электропита. В двухслойных обмотках между верхним и нижним слоями устанавливают изоляционную прокладку, имеющую несколько большую ширину, чем паз. Отогнутые вниз края прокладки предохраняют от возможного проскальзывания проводников одного слоя в другой.

На дно пазов большинства машин с двухслойной обмоткой устанавливают прокладки с целью предохранить материал пазовых коробов от возможных повреждений при уплотнении проводников во время укладки о неровности дна паза, которые возникают из-за технологических допусков при штамповке и шихтовке сердечников.

Проводники обмотки закрепляют в пазах клиньями из текстолита. Под клин устанавливают прокладки из механически прочного изоляционного материала, препятствующие повреждению краев пазового ко-

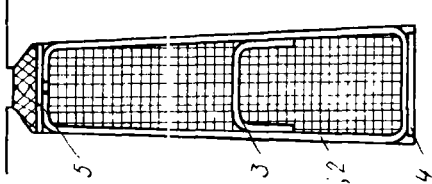
Таблица 3.1. Изоляция обмоток статоров асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 250 мм на напряжение до 660 В

Рисунок	Тип обмотки	Высота оси вращения, мм	По- зи- ция	Наименование материала изоляции (пленкостек- лопласт)			Толщи- на ма- териала, мм	Чис- ло сло- ев	Одно- сторон- ная тол- щина, мм
				Класс нагрево- стойкости					
				В	Г	Н			
	Одно- слой- ная	50-80	1	Изо- флекс	Имидо- флекс	0,2	1	0,2	
			2			0,3		0,3	
		90-132	1	"	"	0,25	1	0,25	
			2			0,35		0,35	
		160	1	"	"	0,4	1	0,4	
			2			0,5		0,5	
	Двух- слой- ная	180-250	1			0,4		0,4	
			2	"	"	0,4	1	0,4	
			3			0,5		0,5	

Примечание. Междофазовые прокладки в лобовых частях обмотки выполняются из материала, указанного для поз. 1 рисунков.

роба при заклинивании пазов. Вместо клиньев обмотка может быть закреплена пазовыми крышками (табл. 3.1), которые изготавливают также из механически прочного изоляционного материала. Пазовые крышки устанавливают на обмоточных станках одновременно с вытягиванием катушек при механической раздельной намотке или на станках для заклиновки после намотки совмещенным методом. После пропитки обмотки лаком пазовые крышки приобретают достаточную прочность и жесткость для надежного закрепления проводников и в то же время занимают меньший объем пазы по сравнению с клиньями, что способствует лучшему заполнению его проводниками обмотки.

Таблица 3.2. Изоляция обмоток из круглого провода статоров асинхронных двигателей с высотой оси вращения $h \geq 280$ мм на напряжение до 660 В

Рисунок	Позиция	Материал		Однослойная толщина изоляции, мм				Число слоев		Класс нагревостойкости			
		Наименование, марка		Толщина, мм				Класс нагревостойкости		Класс нагревостойкости			
		В	Ф	Н	В	Ф	Н	Класс нагревостойкости		В	Ф	Н	Н
	1*	Пленкосинтокартон		ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28
	2**	Электронит		ЛСБ-Л	ЛСП-Л	ЛСК-Л	0,3	0,3	0,3	1	0,3	0,3	0,28
	—	Общая толщина пазовой изоляции		ЛСЛ	ЛСЛ	ЛСЛ	0,55	0,58	0,58	—	0,55	0,58	0,56
	3	Лакотканеослодоткань		ГИТ-Л	ГИП-Л	ГИК-Л	0,55	0,55	0,55	1	0,55	0,55	0,55
	4	Пленкосинтокартон		ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28
	5			ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28

* К обмотке.

** К стенке паза.

Примечание. Междуфазовые прокладки в лобовых частях выполняют из лакотканеослодоткани.

При укладке сыпной обмотки круглые проводники не имеют заранее определенного места в пазу и размещаются в нем произвольно. Поэтому в обмотке специальная витковая изоляция отсутствует. Ее функцию выполняет изоляция обмоточного провода, т.е. проводниковая изоляция. Обмотку из круглого провода применяют в машинах небольшой мощности, имеющих малые габариты и большое число витков, напряжение между витками обмотки которых, как правило, не превышает нескольких вольт. Электрической прочности проводниковой изоляции в таких обмотках оказывается достаточно для обеспечения надежной работы машины.

Междуфазовой изоляцией в пазовой части двухслойных обмоток являются прокладки между слоями. Лобовые части обмотки не имеют корпусной изоляции, а междуфазовая изоляция устанавливается между катушечными группами в виде фигурных прокладок, вырезанных из листового материала по форме лобовых частей уложенной и отформованной обмотки.

Конструкция изоляции обмоток из круглого провода не обеспечивает необходимой электрической прочности при номинальных напряжениях выше 660 В, а малая механическая прочность катушек, особенно их лобовых частей, не позволяет применять круглый провод для обмоток машин мощностью более 100 кВт, так как в переходных процессах (при пуске, реверсе и т.п.) броски тока в машинах вызывают большие ударные нагрузки на обмотку. Поэтому обмотку из круглого провода и применяют в машинах мощностью менее 100 кВт при номинальном напряжении не выше 660 В.

Катушечные обмотки из прямоугольного провода. В машинах мощностью более 100 кВт для придания катушкам большей механической прочности их выполняют из прямоугольного провода и укладывают в пазы с параллельными стенками (рис. 3.6). Катушки наматывают на фигурных шаблонах и уже до укладки в пазы им придают окончательную форму. После укладки лобовые части соседних катушек связывают между собой, а при больших вылетах лобовых частей закрепляют к бандажным кольцам.

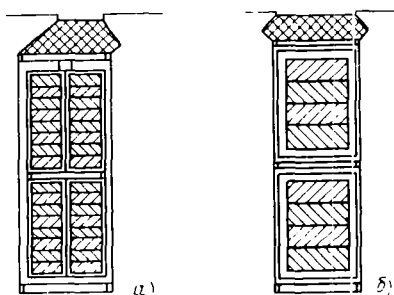


Рис. 3.6. Поперечное сечение пазов статора с обмоткой из прямоугольного провода:

а — полуоткрытого; б — открытого

Упорядоченное расположение лобовых частей катушек позволяет создать с помощью различных прокладок и бандажей жесткую систему, выдерживающую большие ударные механические нагрузки. При этом обеспечивается возможность прохода воздуха между лобовыми частями соседних катушек, что существенно улучшает условия охлаждения по сравнению с обмоткой из круглого провода. При номинальных напряжениях 3 кВ и выше или в машинах специальных исполнений (влагостойком, химостойком и т.п.) при любых напряжениях катушки имеют непрерывную или гильзовую изоляцию и укладываются в открытые прямоугольные пазы.

Гильзовую изоляцию (табл. 3.3 и 3.4) широко применяют в обмотках машин высокого напряжения. После опрессовки и запечки твердые гильзы имеют высокое пробивное напряжение и высокую механическую прочность. Основным недостатком изоляции является наличие слабого в электрическом отношении звена — места стыка двух видов изоляции: гильзовой на прямолинейной пазовой части катушки и непрерывной на лобовой. Этот участок находится непосредственно у выхода прямолинейной части катушки из паза в месте наибольшей напряженности электрического поля — вблизи угла магнитопровода. Тот же участок испытывает и наибольшие деформации как при укладке обмотки, так и при работе машины, так как жесткость лобовых частей катушек существенно меньше, чем пазовых, заключенных в изоляционную гильзу. Поэтому опасность пробоя изоляции в этих местах увеличивается. Для обеспечения надежности принимают специальные меры для усиления изоляции на стыках гильзовой и непрерывной изоляций катушек.

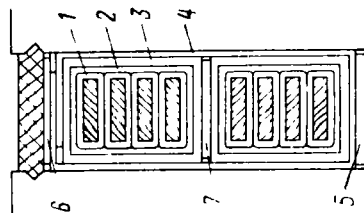
Современная конструкция непрерывной, пропитанной в компаундах изоляции (табл. 3.5) по своим изоляционным свойствам мало уступает гильзовой, но более надежна из-за однородности слоя изоляции на пазовых и лобовых частях катушек, большей стойкости и коронированию и большей влагостойкости. Пропитка непрерывной изоляции на основе слюдинитовых лент в эпоксидных компаундах с последующей ее запечкой создает систему прочной в электрическом и механическом отношении термореактивной изоляции. Современные конструкции термореактивной изоляции типа "Монолит" ("Монолит-2", "Монолит-4") широко применяют для обмотки машин на номинальное напряжение 3 кВ и выше.

Для обмоток применяют прямоугольные провода с площадью поперечного сечения не более $17-20 \text{ мм}^2$, так как при больших сечениях в проводниках обмотки значительно увеличиваются потери от вихревых токов.

Чтобы уменьшить влияние эффекта вытеснения тока на равномерность распределения плотности тока в каждом из проводников, их располагают в пазу плашмя, широкой стороной сечения параллельно дну паза. Если требуемое сечение витка превышает 20 мм^2 , то эффективный

Таблица 3.3. Гильзовая изоляция клещей нагревостойкости F обмоток статоров машин переменного тока мощностью от 100 до 1000 кВт на напряжение 3000–3300 В

Часть обмотки	Позиция	Материал		Число слоев		Толщина изоля- ции, мм	
		Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине по высоте
Пазовая	1	Изоляция проводника	—	—	—	—	—
	2	Стекланная лента	ЛЭС	0,1	1 слой в разбежку	0,2	0,2
	3	Стекломикафолый	МФП-Т	0,2	6,5 оборота	2,6	2,6
		Толщина изоляции катушки	—	—	—	2,8	2,8
		Допустимые отклонения	—	—	—	±0,4	+0,6 -1,2
	4	Стеклолакоткань	ЛСК	0,15	2	0,3	0,45
	5	Стеклотекстолит	СТЭФ	0,5	—	—	0,5
	6	"	СТЭФ	0,5	—	—	0,5
	7	"	СТЭФ	1,0	1	—	1,0
		Допуск на укладку	—	—	—	0,5	0,5
		Всего на паз без клина	—	—	—	3,6	8,6

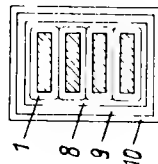


Лобовая

8

9

10



Стеклопластиковая лента

Стеклопластиковая лента

Стеклопластиковая лента

Разбухание от пропитки

Толщина изоляции

катушки

Допустимые отклонения

АЭС

ЛФЭ-ТТ

ЛЭС

0,1

0,13

0,1

1 слой вразбегу

5 слоев вполнахлеста

1 слой вполнахлеста

0,2

2,6

0,4

0,5

3,7

$\pm 0,5$

0,2

2,6

0,4

0,5

3,7

$\pm 1,0$

Выводные концы

Стеклопластиковая лента

Стеклопластиковая лента

ЛФЭ-ТТ

ЛЭС

0,13

0,1

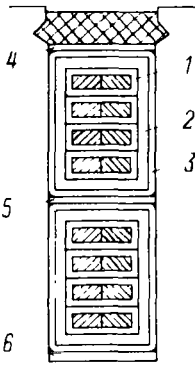
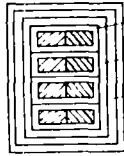
4 слоя вполнахлеста

1 слой вполнахлеста

—

—

Таблица 3.4. Гильзовая терморезистивная изоляция класса нагревостойкости В на напряжение 6600 В

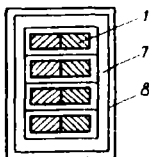
Часть обмотки	Позиция	Назначение изоляции	Материал			Число слоев
			Наименование	Марка	Толщина, мм	
	1	Витковая	Собственная изоляция провода ПЭТВСД	—	0,5 на две стороны	—
	2	Корпусная	Полотно стеклослюдаминозное	—	0,17	—
	2		Распухание изоляции провода	—	—	—
	3	Покровная	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой впритык
	Всего изоляции в катушке					—
	4	Прокладка	Стеклотекстолит	СТ-1	0,5	1
	5	"	"	СТ-1	1	2
	6	"	"	СТ-1	0,5	1
	Зазор на укладку					—
	Всего изоляции в пазу					—
	1	Витковая	Собственная изоляция провода ПЭТВСД	—	0,5 на две стороны	—
	7	—	Разбухание изоляции провода	—	—	—
	8	Корпусная	Слюдапластолента	СЛФЧ	0,13	3 слоя вполнахлеста
	9		Стеклоэкспонированная лента	ЛСЭЛ	0,17	3 слоя вполнахлеста
	9	Покровная	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вполнахлеста
	Разбухание изоляции					—
	Всего изоляции в катушке					—

обмоток статоров машин переменного тока мощностью 100–1000 кВт

Двусторонняя толщина изоляции δ , мм, при числе проводников в катушке															
по ширине								по высоте							
1	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,5	1,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
4,0								4,0							
0,05	0,10	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
0,2								0,2							
4,75	5,30	5,30	5,85	6,40	6,95	7,50	8,05	8,10	9,15	9,70	10,25	10,8	11,35	11,90	12,45
—								0,5							
—								2,0							
—								0,5							
0,2								—							
4,95	5,5	13,6	14,7	15,8	16,9	18,0	19,1	20,2	21,3	22,4	23,5	24,6	25,7	26,8	27,9
0,5	1,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
0,05	0,10	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
1,56								1,56							
2,04								2,04							
0,4								0,4							
1,0								1,0							
5,55	6,10	6,10	6,65	7,20	7,75	8,30	8,85	9,40	9,95	10,50	11,05	11,60	12,15	12,7	13,25

Таблица 3.5. Непрерывная изоляция класса нагревостойкости В обмоток статоров машины переменного тока на напряжение до 10 000 В

Часть обмотки	Позиция	Материал		Число слоев, не менее	Толщина изоляции, мм	
		Наименование, марка	Толщина, мм		по ширине	по высоте
Пазовая	1	Витковая изоляция Изоляция проводника	—			
	2	Корпусная изоляция Стеклолудинитовая лента ЛС на напряжение:	0,13			
		10,5 кВ		9 вполна-хлеста	6	6
		6,6 кВ		6 вполна-хлеста	4,5	4,5
		≤ 660 В		3 вполна-хлеста	2	2
	3	Лента стеклян-ная ЛЭС Толщина изоля-ции катушеч-ной стороны на напряжение:	0,1	1 встык	0,2	0,2
		10,5 кВ			6,2	6,2
		6,6 кВ			4,7	4,7
		≤ 660 В			2,2	2,2
		Прокладки в пазу				
	4	Стеклотексто-лит СТ-1	1	2		2
	5, 6	Стеклотексто-лит СТ-1 Общая толщи-на изоляцин на паз на напряже-ние:	0,5	2		1
		10,5 кВ			6,2	15,4
		6,6 кВ			4,7	12,4
		≤ 660 кВ			2,2	7,4

Часть обмотки	Позиция	Материал		Число слоев, не менее	Толщина изоляции, мм	
		Наименование, марка	Толщина, мм		по ширине	по высоте
	1	Изоляция проводника	—	—	—	—
	7	Стеклослюдинговая лента ЛС на напряжение: 10,5 кВ	0,13	9 вполна-хлеста	6	6
		6,6 кВ		6 вполна-хлеста	4,5	4,5
		≤ 660 В		3 вполна-хлеста	2	2
	8	Лента стеклЯнная ЛЭС (покровная)	0,1	1 встык	0,2	0,2
		Неплотности и неровности	—	—	1	1
		Общая толщина изоляции катушечной стороны на напряжение: 10,5 кВ			7,2	7,2
		6,6 кВ			5,7	5,7
		≤ 660 В			3,2	3,2

проводник образуют из двух или, реже, из четырех или из большего, но обязательно четного числа элементарных проводников.

В катушках, намотанных из двух элементарных проводников, они располагаются рядом на одной высоте (рис. 3.7, а), чтобы их индуктивное сопротивление было одинаково. Взаимное расположение четырех элементарных проводников показано на рис. 3.7, б.

Напряжение между витками в обмотках машин при среднем уровне индукции возрастает с увеличением их габаритов, так как при этом возрастает магнитный поток машины. Машины высокого напряжения изготовляют, как правило, больших мощности и габаритов. Напряжение между витками в их обмотках при номинальном режиме достигает нескольких десятков вольт. Например, в асинхронных двигателях мощностью около 1000 кВт с номинальным напряжением 6 кВ напряжение между витками превышает 50 В. При различных перенапряжениях, свя-

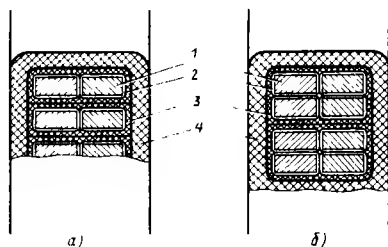


Рис. 3.7. Взаимное расположение элементарных проводников в катушке из прямоугольного провода:

а – при $n_{эл} = 2$; *б* – при $n_{эл} = 4$; 1 – элементарные проводники; 2 – проводниковая изоляция; 3 – витковая изоляция; 4 – пазовая изоляция

занных с коммутационными процессами (включением и отключением двигателей) или атмосферными (грозовые перенапряжения), этот уровень может повышаться в несколько раз. Особенно большие перенапряжения, в десятки и более раз, приходится на витки первой катушки каждой фазы. Поэтому вопросам увеличения надежности витковой изоляции обмоток крупных электрических машин уделяют большое внимание.

В современных машинах высокого напряжения витковую изоляцию выполняют из ленточного материала (микаленты или стекломикаленты), который накладывают по всей длине каждого из витков поверх проводниковой изоляции.

Если эффективный проводник обмотки состоит из нескольких элементарных, витковая изоляция охватывает одновременно все элементарные проводники (рис. 3.7). Толщина витковой изоляции для обмоток машин высокого напряжения приведена в табл. 3.6.

Следует отметить, что кабельная промышленность выпускает обмоточные провода нескольких марок с усиленной изоляцией, при которой не требуется наложения на проводники дополнительного слоя витковой изоляции. Для высоковольтных обмоток с изоляцией класса нагревостойкости В выпускаются обмоточные провода марки ПЭТВСД с усиленной эмалеволлокнистой изоляцией. Разработаны также аналогичные провода для обмоток высокого напряжения класса нагревостойкости F, имеющие изоляцию из стеклослюдинитовых лент. Толщина усиленной проводниковой изоляции меньше, чем обычной проводниковой и витковой изоляции, наложенной на проводник в процессе изготовления катушек, что дает возможность повысить использование зубцовой зоны машины, значительно уменьшает трудоемкость изготовления катушек (отпадает операция по наложению дополнительной витковой изоляции) и повышает надежность изоляции обмотки.

При укладке обмоток в машины высокого напряжения в пазах устанавливают прокладки из механически прочного изоляционного материала (см. табл. 3.3 и 3.4): на дно паза – для предохранения корпусной изоляции катушек от возможного повреждения о неровности дна паза; между слоями обмотки – для придания определенного расстояния между катушками, необходимого для правильного размещения их лобовых

Таблица 3.6. Витковая изоляция обмоток: статоров машин переменного тока с гильзовой изоляцией на напряжение 3300 В и непрерывной компаундированной на напряжение 3300–6600 В

Класс нагревостойкости изоляции	Исполнение корпусной изоляции обмоток	Марка обмоточного провода	Витковая изоляция	
			Материал, толщина, мм, и способ наложения	Двусторонняя толщина изоляции одного витка, мм
Е, В	Непрерывная компаундированная	ПСД	Микалента ЛФЧ-П, 0,1–0,13 мм; 1 слой в 1/3 нахлеста	0,4–0,5
В	Гильзовая	ПСД	Микалента ЛФЧ-П, 0,1–0,13 мм; 1 слой в 1/3 нахлеста	0,4–0,5
Г	"	ПСД	Стекломикалента СЭЛГГ, 0,5–0,13 мм; 1 слой в 1/3 нахлеста	
В, Г	Гильзовая и непрерывная компаундированная	НЭТВСД		

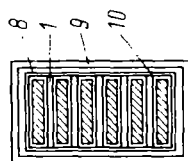
частей; под клин -- для предохранения изоляции от повреждения при заклинивании и плотного закрепления сторон катушек в пазах.

В машинах напряжением до 660 В с усиленной изоляцией (влагостойкой, химостойкой и т.п.) также применяют обмотки из прямоугольных проводов с гильзовой или непрерывной изоляцией (табл. 3.7 и 3.8). Конструкция ее изоляции в основном аналогична конструкции изоляции обмоток высокого напряжения, но имеет меньшую толщину. Применяют два типа гильз -- твердые и мягкие. Твердые гильзы, так же как и в изоляции машин высокого напряжения, выполняют из микафолия, стекломикафолия или из материалов на основе слюдинита с обкаткой горячими утюгами, опрессовкой и последующей запечкой. Мягкие гильзы выполняют из листового материала типа гибкого миканита с последующей обкаткой нанесенных слоев горячими утюгами. Непрерывная изоляция обмоток низкого напряжения по конструкции и технологии изготовления такая же, как и для машин высокого напряжения, но содержит меньшее число слоев. В обмотках некоторых машин изменено по сравнению с машинами высокого напряжения исполнение витковой изоляции. Для усиления изоляции между витками в пазовой и лобовых частях устанавливают прокладки из гибкого изоляционного материала (табл. 3.7).

Таблица 3.7. Гилзовая изоляция (твердая гилъза) обмоток статоров машин переменного тока на напряжение до 660 В

Класс нагревостойкости В нормально-влажностного исполнения									
Часть обмотки	Позиция	Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, мм		Толщина изоляции, мм	
		Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по высоте
	1	Витковая изоляция*	—	—	—	—	—	—	—
	2	Стекланная лента	ЛЭС	0,1	1 слой в разбежку	—	0,2	—	0,2
	3	Микафоллий	МФГ	0,2	3,5 оборота	—	1,4	—	1,4
	4	Двусторонняя толщина изоляции пазовой части катушки	—	—	—	—	1,6	—	1,6
	5	Электронит	—	0,2	2	3	0,4	—	0,6
	6	Лако-стекломинерит	ГФГС-ЛСБ	0,5	—	1	—	—	0,5
	7	Текстолит	В	—	—	—	—	—	0,5
		Допуск на укладку	—	0,5	—	1	0,3	—	0,5
		Всего на паз (без клина и витковой изоляции)	—	—	—	—	2,3	—	5,8

Лобовая



8	Микалента	ЛФЧ-11	0,17	2 слой вполнахлеста	1,4	1,4
9	Стекланная лента	ЛЭС	0,10	1 слой вполнахлеста	0,4	0,4
10	То же	ЛЭС	0,10	1 слой вразбежку	0,2	0,2
	Разбухание изоляции от пропитки	—	—	—	0,5	0,5
	Двусторонняя толщина изоляции лобовой части катушки	—	—	—	2,5	2,5

Класс нагревостойкости В тропического исполнения, классы нагревостойкости F и H всех исполнений

Часть обмотки	Позиция	Наименование	Материал			Число слоев	Толщина изоляции, мм	
			марка для класса нагревостойкости	Толщина, мм	по вырине		по вырине	по вырине
Пазовая (то же, что для класса нагревостойкости В нормального исполнения)	1	Витковая изоляция*						
	2	Стекланная лента	ЛЭС	ЛЭС	0,2	1 слой вразбежку	0,2	0,2
	3	Стекломикафолый	СМФГ	МФП-Г	0,2	3,5 оборота	1,4	1,4
		Двусторонняя толщина на изоляции пазовой части катушки					1,6	1,6
	4	Стеклолакоткань	ЛСБ	ЛСБ	0,15	2	3	0,3
	5	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	0,5	—	1	—
	6	Лакостекломиканит	ГФГС-ЛСБ	ГФПС-ЛСП	0,5	—	1	—
								0,5

Класс нагревостойкости В тропического исполнения, классы нагревостойкости F и H всех исполнений

Часть обмотки	Позиция	Наименование	Материал		Число слоев		Толщина изоляции, мм	
			Марка для класса нагревостойкости	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
			V	F	H			
7		Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК-41	0,5	—	0,5
		Допуск на укладку					0,3	0,5
		Всего на паз (без клина и витковой изоляции)					2,2	5,7
		Стекломинералента	С2ЛФГ	С2ЛФГ	ЛС2ФК	0,17	2 слоя вполнахлеста	1,4
8		Стекломинералента	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,10	1 слой вполнахлеста	0,4
9		Стекломинералента	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,10	1 слой вразбежку	0,2
10		То же						0,5
Лобовая (то же, что для класса нагревостойкости В нормального исполнения)		Разбухание изоляции от пропитки					0,5	0,5
		Двусторонняя толщина изоляции лобовой части катушки					2,5	2,5

* В качестве витковой изоляции в обмотках с изоляцией класса нагревостойкости В применяют прокладки из гибкого минералита ФГ-ФНО, в обмотках с изоляцией класса нагревостойкости F — из гибкого стекломинералита Г₂ФЭ1, в обмотках с изоляцией класса нагревостойкости H — из гибкого стекломинералита Г₂ФК-1. Толщина прокладок 0,2—0,25 мм.

Если номинальное напряжение машины мощностью более 100 кВт не превышает 660 В и к ее изоляции не предъявляют какие-либо специальные требования, то применяют обмотку из подразделенных катушек (см. рис. 3.3,а). Катушки такой обмотки также наматывают из прямоугольного провода, но их пазовая изоляция имеет конструкцию, принятую в обмотке из круглого провода, т.е. изолируют не катушки, а пазы машины. Отсутствие корпусной изоляции на самих катушках позволяет сделать их подразделенными -- по ширине паза располагают по две стороны катушек в каждом слое. Это позволяет уменьшить ширину шлица паза (см. рис. 3.6,а). Такие пазы называют полуоткрытыми. Последовательность укладки подразделенных катушек (их часто называют полукатушками) в полуоткрытые пазы машины показана цифрами (1—4) на рис. 3.8. В такой обмотке изоляция между соседними по ширине паза катушками отсутствует, поэтому их соединяют между собой только параллельно, чтобы напряжение между двумя лежащими рядом по ширине паза проводниками было равно нулю. Такие проводники являются как бы двумя элементарными, образующими один эффективный.

Корпусную изоляцию обмоток из подразделенных катушек выполняют из нескольких слоев листового материала в виде пазового короба. Такая конструкция менее надежна, чем гильзовая или непрерывная изоляция катушек, укладываемых в открытые пазы, но широко применяется, так как машины, статоры которых выполнены с полуоткрытыми пазами, более экономичны. Лобовые части подразделенных катушек изолируют ленточным материалом.

Конструкция изоляции обмотки из подразделенных катушек приведена в табл. 3.9. Для корпусной изоляции класса нагревостойкости В в современных машинах используют листовой слюдопласт, имеющий достаточные механическую и электрическую прочности, что позволяет выполнить пазовый короб из одного слоя лакослюдопласта. При этом толщина изоляции по сравнению с многослойной уменьшается при той же электрической и механической прочности, а теплопроводность возрастает.

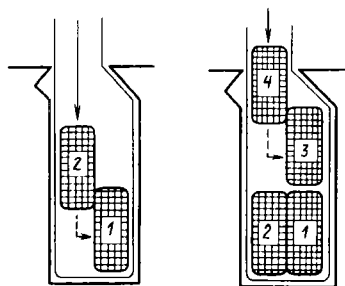
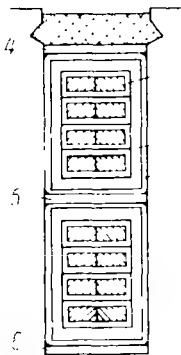
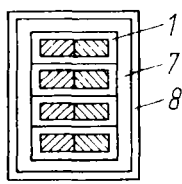


Рис. 3.8. Последовательность укладки подразделенных катушек в полуоткрытые пазы статора (показана стрелками и цифрами)

Таблица 3.8. Непрерывная термореактивная изоляция классов нагревостойкости

Часть обмотки	Позиция	Назначение изоляции	Материал		
			Наименование	Марка	Толщина, мм
Пазовая 	1	Витковая	Стекланная лента (пропитанная в лаке ПЭ-933) Разбухание изоляции от промазки лаком	ЛЭС	0,1
	2	Корпусная	Стеклослюдинитовая лента	ЛСП-7	0,13
	3	Покровная	Стекланная лента (пропитанная в лаке ПЭ-933) Всего изоляции в катушке	ЛЭС	0,2
	4	Прокладка	Стеклотекстолит	СТЭФ-1	0,5
	5	"	"	СТЭФ-1	1,0
	6	"	" Допуск на укладку Всего изоляции в пазу	СТЭФ-1	0,5
Лобовая 	1	Витковая	Стекланная лента (пропитанная в лаке ПЭ-933) Разбухание изоляции	ЛЭС	0,1
	7	Корпусная	Стеклослюдинитовая лента	ЛС-ПЭ-934-ТП	0,13
	8	Покровная	Стекланная лента (пропитанная в лаке ПЭ-933) Всего изоляции в лобовых частях	ЛЭС	0,2

Примечания: 1. Для изготовления катушек следует применять провод
2. При применении провода ПЭТВСД витковую изоляцию (поз. 1) не накладывать.

Полукатушки при изготовлении обмоток наматывают попарно из прямоугольных проводов марок ПЭВП (классы нагревостойкости А и Е), ПЭТВП (класс нагревостойкости В) и ПЭТП-155 (класс нагревостойкости F).

В пазовой части дополнительную витковую изоляцию не устанавливают, так как двойной слой проводниковой изоляции обмоточных проводов этих марок обеспечивает достаточную надежность изоляции между витками обмотки.

В лобовых частях устанавливают прокладки между первыми тремя витками каждой полукатушки, так как эти витки испытывают большое относительное удлинение от растягивающих усилий при их намотке,

В и F обмоток статоров машин переменного тока на напряжение до 660 В

Двусторонняя толщина, мм, при числе проводников

Число слоев	по ширине			по высоте			
	1	2	2	3	4	5	6
1 слой вполна-хлеста	0,45	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7
	0,05	0,1	0,1	0,15	0,20	0,25	0,3
4 слоя вполна-хлеста	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
1 слой вполна-хлеста	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
	3,03	3,08	3,53	4,03	4,53	5,03	5,53
1	—	—	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
1	—	—	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1	—	—	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	0,2	0,2	—	—	—	—	—
	3,23	3,28	9,06	10,06	11,06	12,06	13,06
1 слой вполна-хлеста	0,45	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7
	0,05	0,1	0,1	0,15	0,2	0,15	0,3
3 слоя вполна-хлеста	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
2 слоя впритык	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	2,96	3,01	3,46	3,96	4,46	4,96	5,46

ПСД или ПЭТВСД.

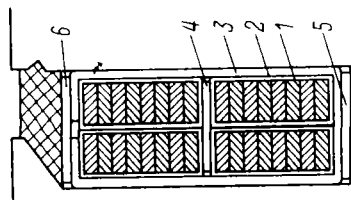
которое может привести к снижению прочности проводниковой изоляции или к ее повреждению.

После намотки витки полукатушек для предохранения от рассыпания проклеивают лаком (обволакивают) и скрепляют по длине пазовой части телефонной (при классе нагревостойкости В) или фенилоновой (при классе нагревостойкости F) бумагой и опрессовывают [3, 23].

Стержневые обмотки статоров. Отдельным элементом стержневой обмотки является не катушка, а стержень. Стержни укладывают в пазы поочередно и только после укладки соединяют между собой в лобовых частях, образуя витки обмотки. Стержневая обмотка может быть выполнена как петлевой, так и волновой. В зависимости от этого меняется на-

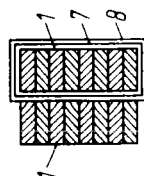
Таблица 3.9. Изоляция обмоток статоров машин переменного тока с полукрытыми прямоугольными пазами на напряжение до 660 В

Часть обмотки	Позиция	Материал			Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм	
		Наименование, марка		Толщина, мм		по ширине	по высоте
		Класс на грев стойкости					
		В	Ф				
Пазовая	1	Обволакивающее покрытие			0,05	0,2	0,2
	2	Бумага телефонная бакелизированная	Бумага фенилоновая лакированная		0,09	0,6	0,6
	3	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	Лакотканеслодопласт ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ	0,55	1,1	1,1
	4	СТ	Стеклотекстолит	СТК	1,0	—	1,0
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	—	0,5
	6	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	—	0,5
Допуск на укладку обмотки					—	0,3	0,6
Общая толщина изоляции в пазу (без витковой и без клина)					—	2,2	4,5



Любовая
Полукатушки группы:

крайние



1 7	Скрепляющий бандаж из ленты стекляной ЛЭС шириной 20 мм в двух местах	0,1	2,5 оборота	0,5	0,5
8	Обволакивающее покрытие Стеклолакоткань ЛСБ-105/120 ЛСП-130/155 ЛСК-155/180 Стегляная лента ЛЭС	0,05	1	0,1	0,1
1	Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой) Скрепляющий бандаж из ленты стекляной ЛЭС шириной 20 мм в трех местах Обволакивающее покрытие Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)	0,15	1	0,6	0,6
1	Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой) Скрепляющий бандаж из ленты стекляной ЛЭС шириной 20 мм в трех местах Обволакивающее покрытие Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)	0,1	2,5 оборота	0,5	0,5
1	Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой) Скрепляющий бандаж из ленты стекляной ЛЭС шириной 20 мм в трех местах Обволакивающее покрытие Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)	0,05	1	0,1	0,1
1	Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой) Скрепляющий бандаж из ленты стекляной ЛЭС шириной 20 мм в трех местах Обволакивающее покрытие Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)	0,05	1	0,1	0,1

правление отгиба лобовых частей стержня. С точки зрения электромагнитного расчета стержневая обмотка идентична катушечной с одним витком в каждой катушке, но имеет ряд особенностей, обусловленных тем, что в двухслойной стержневой обмотке число эффективных проводников в пазу всегда равно двум ($u_p = 2$). При этом сечение стержня может быть значительно большим, чем сечение эффективного проводника в обмотке с многovitковыми катушками. В то же время число витков в фазе такой обмотки $w = Z/(ma)$ (m — число фаз, Z — число пазов, a — число параллельных ветвей) и в трехфазных машинах не может быть более $Z/3$. Эти особенности (большое сечение эффективного проводника и малое число витков в фазе) определяют область применения стержневых обмоток — это статорные обмотки крупных электрических машин.

Стержневую обмотку применяют в основном в статорах мощных синхронных турбо- и гидрогенераторов, однако необходимость ее выполнения может возникнуть и при проектировании синхронных или асинхронных машин мощностью в несколько тысяч киловатт, т.е. в машинах с большими номинальными токами и большим магнитным потоком.

В обмотках статоров машин переменного тока протекает ток промышленной частоты, поэтому для уменьшения потерь на вихревые токи стержни выполняют не из массивных медных шин, а из многих изолированных между собой параллельных проводников, которые называют элементарными (рис. 3.9). Площадь поперечного сечения каждого элементарного проводника не должна превышать $17\text{--}20\text{ мм}^2$. Суммарное сечение всех элементарных проводников, составляющих один стержень, равно сечению эффективного проводника.

Для уменьшения действия эффекта вытеснения тока элементарные проводники при сборке стержня переплетают между собой определенным образом так, чтобы каждый из них на протяжении пазовой части занимал попеременно все возможные положения по высоте стержня. Такое переплетение называют транспозицией. С расчетом и методами выполнения транспозиции можно ознакомиться в литературе по проектированию крупных машин переменного тока [26, 28].

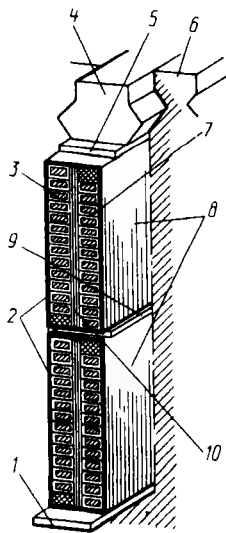


Рис. 3.9. Стержни обмотки в пазах статора:

1 — прокладка на дно паза; 2 — корпусная изоляция стержня; 3 — элементарные проводники; 4 — пазовый клин; 5 — прокладка под клин; 6 — зубец статора; 7 — проводниковая изоляция элементарных проводников; 8 — стержни обмотки; 9 — прокладка между стержнями; 10 — прокладка между столбиками

В стержневых обмотках статоров машин высокого напряжения (рис. 3.9) корпусную изоляцию выполняют непрерывной и пропитывают в эпоксидных (класс нагревостойкости В) или битумных (класс нагревостойкости Е) компаундах. Она имеет все отличительные свойства непрерывной компаундированной изоляции катушечной обмотки машин высокого напряжения, рассмотренные выше.

Особенностью конструкции изоляции высокого напряжения стержневых обмоток статоров машин переменного тока является отсутствие специальной витковой изоляции, так как при двух эффективных проводниках в пазу между ними находятся два слоя корпусной изоляции стержней. Это в значительной степени увеличивает надежность стержневых обмоток по сравнению с катушечными. Элементарные проводники стержней изготавливают из обмоточного провода марки ПСД или ПСДК.

Для того чтобы иметь возможность произвести транспозицию элементарных проводников, их размещают в стержне в два столбика, между которыми располагают вертикальную прокладку из прочного в механическом отношении изоляционного материала (рис. 3.9).

3.3. ОБМОТКИ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Обмотки фазных роторов асинхронных двигателей. В зависимости от мощности машины обмотки фазных роторов асинхронных двигателей выполняют из круглого или прямоугольного изолированного обмоточного провода, из неизолированной прямоугольной медной проволоки или из медных шин.

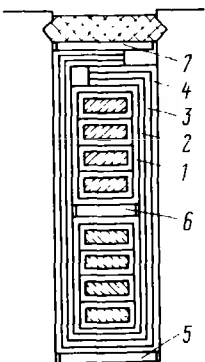
Обмотки из круглого провода применяют в роторах двигателей небольшой мощности. Они имеют такую же конструкцию и изоляцию, как и аналогичные обмотки статора.

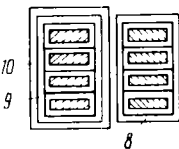
Обмотки роторов из прямоугольного обмоточного провода выполняют в двигателях мощностью до 100 кВт. Предварительно намотанные, растянутые и отрихтованные катушки укладывают в открытые прямоугольные пазы ротора. Конструкция пазовой изоляции (табл. 3.10) такая же, как и в статорах машин с номинальным напряжением до 660 В, т.е. представляет собой пазовый короб, состоящий из нескольких слоев изоляционного материала. Лобовые части изолируют ленточным материалом, причем на лобовые части крайних катушек в катушечных группах накладывают усиленную изоляцию по сравнению со средними катушками в группе, чем достигается надежность изоляции между фазами обмотки ротора.

Стержневые обмотки фазных роторов асинхронных двигателей применяют в машинах мощностью более 100 кВт, а в некоторых исполнениях — начиная с мощности 40–50 кВт. Обмотки выполняют из прямоугольной шинной меди. Механическая жесткость стержней дает возможность выполнить пазы ротора полузакрытыми с узкой прорезью, что способствует улучшению рабочих характеристик двигателей. Стержни

вставляют в пазы с торца ротора, поэтому до укладки изгибают только одну лобовую часть стержня. Вторую лобовую часть изгибают после установки стержня на место в паз.

Таблица 3.10. Изоляция катушечной обмотки фазных роторов асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт класса нагревостойкости В

Часть обмотки	Позиция	Материал			Количество слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм	
		Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
		Разбухание изоляции от промазки лаком	—	—	—	—	0,1	0,1
	1	Стекланная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2
		Всего на одну катушку	—	—	—	—	0,3	0,3
	2	Стеклолакоткань	ЛСБ	0,2	2	3	0,4	0,6
	3	Гибкий миканит	ГФС	0,2	2	3	0,4	0,6
	4	Стеклолакоткань	ЛСБ	0,2	2	3	0,4	0,6
	5	Стеклотекстолит	СТ	0,5	—	1	—	0,5
	6	Стеклотекстолит	СТ	0,5	—	1	—	0,5
	7	"	СТ	0,5	—	1	—	0,5
		Допуск на укладку	—	—	—	—	0,5	0,8
		Всего на паз без клина	—	—	—	—	2	4,7

Часть обмотки		Пози- ция	Материал		Тол- щи- на, мм	Количе- ство слоев		Двусторон- няя толщи- на изоля- ции, мм	
			Наиме- нова- ние	Мар- ка		по ши- рине	по вы- соте	по ши- рине	по вы- соте
	Лобовая	8	Стеклян- ная лен- та	ЛЭС	0,2	1 слой впол- нахлеста	0,8	0,8	
	Сред- ние ка- тушки в кату- шечной группе	9	Стекло- лакотка	ЛСБ	0,2	1 слой впол- нахлеста	0,8	0,8	
	Край- ние ка- тушки в кату- шечной группе	10	Стеклян- ная лен- та	ЛЭС	0,2	1 слой впол- нахлеста	0,8	0,8	
	Толщина изоляции крайних катушек					-	1,6	1,6	

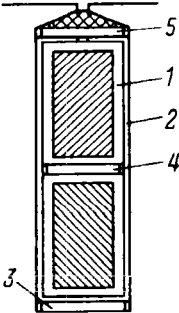
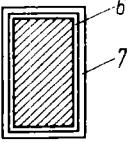
Конструкция изоляции стержневых обмоток роторов приведена в табл. 3.11. В таблице даны два значения числа слоев и толщины изоляции в зависимости от напряжения на контактных кольцах ротора, которое определяется обмоточными данными машины.

Гильзы для роторных стержней изготавливают из микафолия, стекломикафолия или из листовых материалов на основе слюдинитов: слюдинитофолия, стеклослюдинитофолия. В качестве связующих для изготовления гильз применяют термореактивные лаки. Лобовые части стержней изолируют ленточными материалами. Слабым в электрическом отношении местом изоляции роторных стержней, так же как и в катушечных обмотках статоров с гильзовой изоляцией, является место стыка двух видов изоляции — гильзовой на пазовой части и непрерывной на лобовой.

Для того чтобы увеличить электрическую прочность изоляции этого участка, его изолируют с постепенным переходом от гильзовой к непрерывной изоляции по типу конуса или обратного конуса.

В последнее время изоляцию стержней фазных роторов для двигателей некоторых типоразмеров выполняют непрерывной из ленточного

Таблица 3.11. Изоляция стрежневых обмоток фазных роторов асинхронных

Часть обмотки	Позиция	Материал				
		Наименование, марка			Толщина, мм	
		Класс нагревостойкости			Класс нагревостойкости	
		В	Ф	Н	В	Ф и Н
Пазовая 	1	Стеклопленоч- пластофоль ИФГ-Б	Синтофо- лий-Ф	Синтофо- лий-Н	0,15	0,16
	2	Стеклолакоткань ЛСБ-105/120	ЛСП-130/155	ЛСК-155/180	0,15	
	3	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	
	4	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	
		Допуск на укладку обмотки				—
		Общая толщина изоляции в пазу (без клина)				
Лобовая 	6	Стеклопленоч- нитовая лента ЛС-ПЭ-934-ТП	Пленка поли- имидная $0,05 \times 3 = 0,15$		0,15	
	7	Стеклопленоч- лента ЛЭС			0,1	
		Общая толщина изоляции стержня в лобовой части				

* С учетом усадки на 15–20%.

материала по всей длине стержня с последующей опрессовкой и запечкой изоляции в горячих прессах.

Короткозамкнутые обмотки. В роторах асинхронных двигателей широко распространены короткозамкнутые обмотки. Они также применяются как демпферные и пусковые в роторах синхронных машин.

Основное их отличие от всех остальных обмоток электрических машин заключается в отсутствии изоляции между пазовой частью обмотки и стенками паза. Встречающиеся иногда *m*-фазные изолированные и замкнутые накоротко обмотки роторов асинхронных машин специального исполнения здесь не рассматриваются.

двигателей с высотой оси вращения ≥ 280 мм

Напряжение до 750 В				Напряжение до 1200 В			
Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм		Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм	
Класс нагревостойкости		по ширине	по высоте	Класс нагревостойкости		по ширине	по высоте
В	Г и Н			В	Г и Н		
4,5*оборота	3,5 оборота	1,1	2,2	9,5*оборота	7,5 оборота	2,4	4,8
	1	0,3	0,3	1	1	0,3	0,3
	1		0,5	1	1	—	0,5
	1	—	0,5	1	1	—	0,5
	1	—	0,5	1	1	—	0,5
	—	0,3	0,5	—	—	0,3	0,5
		1,7	4		—	3	6,6
1 слой вполнахлеста		0,6	0,6	2 слоя вполнахлеста		1,2	1,2
1 слой сполнахлеста		0,4	0,4	2 слоя вполнахлеста		0,8	0,8
—		1,0	1,0			2,0	2,0

Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей делятся по конструкции и технологии изготовления на два типа: сварные и литые (рис. 3.10).

Демпферные и пусковые обмотки синхронных машин выполняют только сварной конструкции. Стержни обмотки в подавляющем большинстве случаев круглого сечения, располагают в пазах полюсных наконечников.

Демпферные обмотки синхронных двигателей более мощные, чем синхронных генераторов, так как их используют так же и как пусковые.

У генераторов демпферные обмотки выполняют из меди. В двигателях для улучшения пусковых характеристик часто применяют латунь.

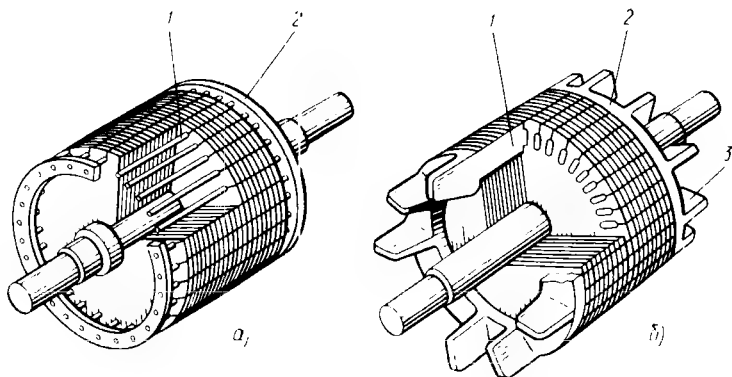


Рис. 3.10. Короткозамкнутые роторы асинхронных двигателей:

а — со вставными стержнями; *б* — с литой обмоткой; 1 — стержни обмотки; 2 — замыкающие кольца; 3 — вентиляционные лопасти

3.4. КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПОЛНЕНИЯ ПАЗА

Зубцовая зона — наиболее напряженный в магнитном отношении участок магнитопровода, поэтому при проектировании машин стремятся выбрать наименьшие размеры пазов, обеспечивающие размещение в них необходимого числа проводников и изоляции. Степень использования объема пазы для размещения меди обмотки оценивается коэффициентом заполнения пазы медью k_M , представляющим собой отношение суммарной площади поперечного сечения всех проводников в пазу к площади поперечного сечения пазы "в свету" $S_{\text{п}}$:

$$k_M = q_{\text{эл}} n_{\text{эл}} u_{\text{п}} / S_{\text{п}}, \quad (3.1)$$

где $n_{\text{эл}}$ — число элементарных проводников в одном эффективном; $q_{\text{эл}}$ — площадь поперечного сечения элементарного проводника; $u_{\text{п}}$ — число эффективных проводников в пазу.

Коэффициент k_M зависит от общего количества изоляции в пазу, т.е. от толщины корпусной, витковой и проводниковой изоляции и наличия различных изоляционных прокладок. При возрастании толщины изоляции, например, в машинах с более высоким номинальным напряжением или при использовании худших изоляционных материалов коэффициент заполнения пазы медью уменьшается. Это приводит к ухудшению использования пазового пространства, а следовательно, и всей зубцовой зоны машины.

Средние значения k_M для современных электрических машин в зависимости от номинального напряжения и типа обмоток приведены в табл. 3.12.

Таблица 3.12. Средние значения коэффициента заполнения паза медью k_M

Тип обмотки	Коэффициент k_M
Обмотки из круглого провода с эмалевой изоляцией на напряжение до 660 В	0,3
Обмотки из прямоугольного провода на напряжение 3000 В (провод марки ПСД)	0,22 - 0,37
Обмотки из прямоугольного провода на напряжение 6000 В	0,14 - 0,25

В машине с обмотками из прямоугольных проводов k_M может быть рассчитан достаточно точно, так как при проектировании заранее определяют местоположение каждого проводника в пазу.

В обмотках из круглого провода положение каждого проводника в пазу заранее не может быть определено. Кроме того, плотность размещения проводников в пазу непостоянна. Она зависит от усилий, прикладываемых обмотчиком при уплотнении проводников по мере укладки их в пазы. Опытом установлено, что при чрезмерно большой плотности укладки круглых проводов трудоемкость обмоточных работ неоправданно возрастает, а надежность обмотки резко ухудшается из-за возникающих при этом механических повреждений проводниковой изоляции.

Плотность укладки проводников в пазы оценивается технологическим коэффициентом заполнения проводниками свободной от изоляции площади поперечного сечения паза:

$$k_3 = d_{из}^2 n_{эл} u_{п'} / S_{п'}'. \quad (3.2)$$

Числителем этого выражения является произведение площади квадрата, описанного вокруг изолированного элементарного проводника с диаметром $d_{из}$, на число всех элементарных проводников в пазу $n_{эл} u_{п'}$, а знаменателем — площадь поперечного сечения паза, свободная от изоляции $S_{п'}'$, т.е. та площадь, в которой располагаются проводники обмотки. Коэффициент k_3 обычно называют коэффициентом заполнения паза. Он характеризует только технологичность укладки обмотки из круглого провода, а не степень использования объема паза для размещения проводников обмотки. Так, при одной и той же плотности укладки обмотки k_3 будет одинаков для обмоток машин с разной толщиной пазовой или проводниковой изоляции, при двухслойной или однослойной обмотках и т.п.

В современном электромашиностроении плотность укладки обмотки стремятся выполнить такой, чтобы k_3 был в пределах 0,7—0,75, причем меньшие значения — в машинах с числом полюсов, равным двум.

Следует отметить, что увеличение числа элементарных проводников в одном эффективном, т.е. применение обмоточного провода меньшего диаметра при прежней площади эффективного проводника, приводит к

некоторому возрастанию коэффициента заполнения, и наоборот. Это объясняется тем, что толщина изоляции обмоточного провода остается постоянной при сравнительно больших изменениях диаметра круглых обмоточных проводов (см. приложение ПЗ).

3.5. ЭЛЕМЕНТЫ СХЕМ И ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЫВОДОВ ТРЕХФАЗНЫХ ОБМОТОК

Основным элементом обмотки электрической машины является виток. Несколько последовательно соединенных витков, находящихся в одних и тех же пазах, объединяют между собой общей корпусной изоляцией, в результате чего образуется катушка обмотки. Каждую из сторон катушки располагают в одном пазу. Если весь паз занят стороной только одной катушки (стороны катушек располагают в один слой), то обмотку называют однослойной. Если в каждом пазу размещены стороны двух катушек, одна над другой, то обмотку называют двухслойной.

Несколько последовательно соединенных между собой катушек, расположенных в соседних пазах, образуют катушечную группу, представляющую собой обмотку полюса или пары полюсов одной из фаз машины. Число катушек в катушечной группе обозначают q . Так как q катушек располагают в соседних пазах, то одноименные стороны этих катушек занимают q пазов, поэтому число q называют числом пазов на полюс и фазу, т.е. числом пазов, в которых лежат стороны катушек, образующих обмотку полюса одной фазы машины.

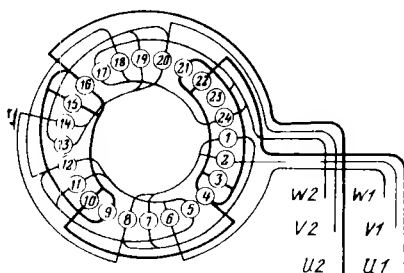
В одной катушечной группе все катушки могут быть соединены только последовательно, так как векторы ЭДС катушек, находящихся в различных пазах, сдвинуты относительно друг друга на пазовый угол и при параллельном соединении возникают большие уравнивающие токи. Параллельное соединение катушек в одной группе применяют в некоторых специальных обмотках крупных двухполюсных турбогенераторов. Возможность таких соединений рассматривают в специальной литературе [26].

Несколько соединенных между собой катушечных групп образуют фазу обмотки. Катушечные группы в фазе могут быть соединены последовательно, параллельно или иметь смешанное, последовательно-параллельное соединение. Количество катушечных групп в каждой из фаз зависит от числа полюсов и типа обмотки. Число параллельных ветвей при соединении катушечных групп определяют при расчете обмоток.

Концы фаз в большинстве случаев внутри машины не соединяют, а подводят к зажимам коробки выводов все начала и все концы фаз, что позволяет включать машины на два напряжения сети, соединяя фазы в звезду или в треугольник. Напряжение, приходящееся на фазу обмотки статора, при этом не изменяется.

Изображение схемы обмотки. Порядок соединения между собой отдельных катушек, катушечных групп и фаз обмотки задают в техниче-

Рис. 3.11. Торцевая схема однослойной concentрической обмотки, $Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$



ской документации в виде чертежа, который называют схемой обмотки. При вычерчивании схем принят ряд условностей: чертеж с изображением схемы обмотки выполняется без соблюдения масштаба и не отражает никаких соотношений размеров машины и обмотки и ее частей; каждая катушка изображается одной линией независимо от числа витков в ней и элементарных проводников в каждом эффективном проводнике; все катушки изображают в одной плоскости и т.п.

Известны несколько способов изображения схем, из которых наибольшее распространение получили так называемые развернутые и торцевые схемы. Торцевая схема представляет собой как бы вид с торца на обмотанный сердечник (рис. 3.11). На ней хорошо прослеживаются положения лобовых частей катушек, но недостаточно места для изображения межкатушечных и межгрупповых соединений, что неудобно в сложных схемах, имеющих несколько параллельных ветвей.

Развернутые схемы представляют собой развертку статора или ротора с обмоткой и позволяют показывать все соединения между элементами обмотки — катушками и катушечными группами.

Фазная зона. Стороны катушек одной катушечной группы распределены в q лежащих друг за другом пазах. В симметричной m -фазной обмотке на каждом полюсном делении таких групп будет m по q пазов в каждой. Следовательно, стороны катушек, принадлежащих одной фазе, расположены на каждом полюсном делении t в пазах, занимающих $1/m$ -ю его часть, или $[\pi D / (2pm)] = \tau/m$ -ю часть окружности зазора, называемую фазной зоной. В обмотках трехфазных машин, построенных по такому принципу, фазная зона занимает дугу окружности, содержащую электрический угол $\tau/m = 180^\circ / 3 = 60^\circ$, поэтому такие обмотки называют обмотками с 60-градусной фазной зоной.

Иногда применяют обмотки, в которых m фазовых пазов располагают на двух полюсных делениях. Фазная зона таких обмоток занимает $2\tau/m$ -ю часть окружности, что соответствует электрическому углу 120° в трехфазных машинах. Такие обмотки называют обмотками с 120-градусной фазной зоной.

В большинстве трехфазных машин общего назначения применяют обмотки с 60-градусной фазной зоной. Однако встречаются и машины с обмотками, имеющими 120-градусную фазную зону. Например, в мно-

госкоростных асинхронных двигателях с полюсно-переключаемой обмоткой при включении на большее число полюсов обмотка имеет 60-градусную фазную зону, а при включении на работу с меньшим числом полюсов – 120-градусную фазную зону.

В учебнике рассматриваются наиболее распространенные схемы обмоток с 60-градусной фазной зоной. Принципиально схемы обмоток со 120-градусной фазной зоной не отличаются от рассматриваемых ниже, однако при их составлении и расчете обмоточных коэффициентов необходимо учитывать особенности этого вида обмоток [18, 28].

Обозначение выводов обмоток трехфазных машин. В настоящее время действуют две системы обозначений выводов обмоток электрических машин. Одна из них, установленная ГОСТ 183-74, сохраняется для разработанных до 1987 г. и модернизируемых машин. Выводы обмоток этих машин обозначают буквами русского алфавита: обмоток статора – С, обмоток ротора асинхронных двигателей – Р, обмоток возбуждения синхронных машин – И. Цифрами после букв обозначают начала и концы фаз: первой фазы соответственно 1 и 4, второй фазы 2 и 5, третьей фазы 3 и 6. В табл. 3.13 приведены установленные ГОСТ 183-74 обозначения в зависимости от числа выводов и схемы соединения обмоток. Обозначения должны быть нанесены непосредственно на концы выводов: на кабельные наконечники, шинные концы или специальные обжимы, плотно закрепленные на выводах.

В машинах малых размеров, в которых буквенно-цифровые обозначения затруднены из-за недостатка места, ГОСТ разрешает использовать цветовые обозначения (табл. 3.14) проводами с разноцветной изоляцией, красками и т.п.

Для машин, разработанных после 1-го января 1987 г., установлена система обозначений выводов обмоток (ГОСТ 26772-85), соответствующая международным стандартам. По этой системе (табл. 3.15) выводы обозначают буквами латинского алфавита: первой фазы обмотки статора – буквой *U*, второй фазы – буквой *V*, третьей фазы – буквой *W*; выводы обмотки ротора соответственно по фазам – буквами *K*, *L* и *M*; выводы обмотки возбуждения синхронных машин – буквой *F*. Начала и концы фаз обозначаются соответственно цифрами 1 и 2, стоящими после букв. При наличии промежуточных выводов они обозначаются буквой, определяющей фазу, и последующими цифрами: 3, 4 и т.д.

Цветовые обозначения выводов обмоток для машин, в которых буквенно-цифровые обозначения затруднены, сохраняют такими же, как и при прежней системе обозначений (см. табл. 3.14).

Обозначения должны наноситься на начала и концы обмоток или на колодку зажимов рядом с выводами. Если соединения фаз произведены внутри корпуса машины, например обмотка статора постоянно соединена в треугольник, то начала и концы фаз не обозначают, а на выведенные концы обмотки наносят буквенные обозначения без цифр. Также опускают цифры в обозначении выводов фаз обмоток, соединенных внутри

Таблица 3.13. Обозначения выводов обмоток электрических машин переменного тока, разработанных до 1987 г. и модернизируемых (ГОСТ 183-74)

Наименование и схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фа- зы или вывода	Обозначение выводов	
			Начало	Конец
Обмотка статора:				
открытая схема	6	Первая фаза	C1	C4
		Вторая фаза	C2	C5
		Третья фаза	C3	C6
соединение звездой	3	Первая фаза		C1
	или	Вторая фаза		C2
	4	Третья фаза		C3
		Нулевая точка		0
соединение треугольником	3	Первый вывод		C1
		Второй вывод		C2
		Третий вывод		C3
Обмотка возбуждения (индукторов) синхронных машин	2	—	И1	И2
Обмотка фазного ротора асинхронных двигателей	3	Первая фаза		P1
		Вторая фаза		P2
		Третья фаза		P3
	4	Первая фаза		P1
		Вторая фаза		P2
		Третья фаза		P3
		Нулевая точка		0

Примечания: 1. В чертежах электрических схем соединения обмоток с 6 выводными концами (в рисунках на свободном поле схемы) допускается применение двойных обозначений (C1C6; C2C4; C3C5) при соединении фаз в треугольник и тройного обозначения (C4C5C6) точки звезды (нулевой точки) при соединении фаз в звезду.

2. Выводы составных и секционированных обмоток статором машин следует обозначать теми же буквами, что и простые обмотки, но с дополнительными цифрами впереди букв. Например, выводы первой обмотки (первой секции) первой фазы: начало 1C1, конец 1C4, выводы второй обмотки (секции) первой фазы: начало 2C1, конец 2C4.

3. Контактные кольца ротора асинхронных двигателей обозначают так же, как присоединенные к ним выводы обмотки ротора, при этом расположение колец должно быть в порядке цифр, указанных в таблице, а кольцо 1, соединенное с выводом P1, должно быть наиболее удаленным от обмотки ротора.

Таблица 3.14. Цветовое обозначение выводов обмоток статора трехфазных машин переменного тока

Схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Цветовой код выводов	
			Начало	Конец
Открытая схема	6	Первая фаза	Желтый	Желтый с черным
		Вторая фаза	Зеленый	Зеленый с черным
		Третья фаза	Красный	Красный с черным
Звезда	3	Первая фаза	Желтый	—
		Вторая фаза	Зеленый	—
	4	Третья фаза	Красный	—
		Нулевая точка	Черный	—
Треугольник	3	Первый вывод	Желтый	—
		Второй вывод	Зеленый	—
		Третий вывод	Красный	—

Таблица 3.15. Обозначения выводов обмоток электрических машин переменного тока, разработанных после 1.01.1987 г. (ГОСТ 26772-85)

Наименование и схема соединения	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение выводов	
			Начало	Конец
Обмотка статора :				
открытая схема	6	Первая фаза	<i>U1</i>	<i>U2</i>
		Вторая фаза	<i>V1</i>	<i>V2</i>
		Третья фаза	<i>W1</i>	<i>W2</i>
соединение в звезду	3	Первая фаза		<i>U</i>
		Вторая фаза		<i>V</i>
	4	Третья фаза		<i>W</i>
		Точка звезды		<i>N</i>
соединение в треугольник	3	Первый вывод		<i>U</i>
		Второй вывод		<i>V</i>
		Третий вывод		<i>W</i>
секционированная обмотка	12	Первая фаза	<i>U1</i>	<i>U2</i>
		Выводы от первой фазы	<i>U3</i>	<i>U4</i>
		Вторая фаза	<i>V1</i>	<i>V2</i>
		Выводы от второй фазы	<i>V3</i>	<i>V4</i>
		Третья фаза	<i>W1</i>	<i>W2</i>
		Выводы от третьей фазы	<i>W3</i>	<i>W4</i>

Наименование и схема соединения	Число выво- дов	На именованние фазы или вывода	Обозначение выводов	
			Начало	Конец
расцепленные обмот- ки, предназначенные для последовательного или параллельного включения	-	Первая фаза	<i>U1</i>	<i>U2</i>
			<i>U5</i>	<i>U6</i>
		Вторая фаза	<i>V1</i>	<i>V2</i>
			<i>V5</i>	<i>V6</i>
		Третья фаза	<i>W1</i>	<i>W2</i>
			<i>W5</i>	<i>W6</i>
раздельные обмотки, предназначенные для последовательного или параллельного вклю- чения		Первая фаза	<i>1U1</i>	<i>1U2</i>
			<i>2U1</i>	<i>2U2</i>
		Вторая фаза	<i>1V1</i>	<i>1V2</i>
			<i>2V1</i>	<i>2V2</i>
		Третья фаза	<i>1W1</i>	<i>1W2</i>
			<i>2W1</i>	<i>2W2</i>
Обмотка фазного ротора асинхронного двигателя:				
открытая схема	6	Первая фаза	<i>K1</i>	<i>K2</i>
		Вторая фаза	<i>L1</i>	<i>L2</i>
		Третья фаза	<i>M1</i>	<i>M2</i>
соединение в звезду или	3	Первая фаза		<i>K</i>
	4	Вторая фаза		<i>L</i>
		Третья фаза		<i>M</i>
		Точка звезды		<i>Q</i>
соединение в треугольник	3	Первый вывод		<i>K</i>
		Второй вывод		<i>L</i>
		Третий вывод		<i>M</i>
Обмотка возбуждения синхронных машин	2	-	<i>F1</i>	<i>F2</i>

машины в звезду. Если в обмотке имеется вывод от нулевой точки (точки звезды), он обозначается в обмотке статора буквой *N*, в обмотке ротора буквой *Q*.

На схемах обмоток обычно обозначают все начала и концы фаз, причем на свободном поле схемы допускается применение двойных или тройных обозначений точек соединения разных фаз. Например, точки соединений фаз обмотки в треугольник могут быть обозначены *U1W2*, *V1U2*, *W1V2*, а выводы от этих точек – соответственно *U*, *V* и *W*. При соединении обмоток в звезду на схемах допускается обозначение начал фаз *U1*, *V1*, *W1* и точек соединения фаз внутри машины *U2*, *V2*, *W2*.

Расположение выводов фаз. Стороны катушек, с которыми соединяют начала фаз обмоток, должны располагаться в пазах, между которыми

заключается такой же электрический угол, как и между фазами питающей сети, т.е. $2\pi/m$ радиан или $2\pi k/m$ радиан, где k — любое целое число, не кратное m . В трехфазных машинах это $120^\circ \cdot k$, где k — не кратное трем. При k , кратном трем, в таких пазах располагают стороны катушек, принадлежащих одной и той же фазе. Учитывая, что пазовый угол $\alpha_Z = 2\pi p/Z$, получаем, что начальные стороны первых катушек разных фаз должны быть расположены через

$$\frac{2\pi k/m}{2\pi p/Z} = \frac{Zk}{pm} = 2qk \text{ пазов.}$$

В обмотках статоров для уменьшения длины выводных концов выводы фаз стремятся расположить как можно ближе один к другому. Для этого принимают $k = 1$ и начала фаз располагают через $2q$ пазов друг от друга.

В обмотках фазных роторов асинхронных двигателей, чтобы избежать дисбаланса, который появится при неравномерном расположении начал фаз, начала фаз стремятся расположить симметрично по окружности ротора, т.е. через Z/m пазов (при этом $k = p$). Симметричное расположение выводов обмоток возможно лишь при числе полюсов машины, не кратном трем. При p , кратном трем, например в машинах с $2p = 6, 12$ и т.д., симметрично расположить выводы обмотки фазного ротора не удастся, и схемы обмоток усложняются [21, 23].

3.6. ОБМОТОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ

Обмоточный коэффициент $k_{об}$ учитывает уменьшение ЭДС распределенной обмотки по сравнению с ЭДС обмотки с тем же числом витков, но имеющих диаметральный шаг и сосредоточенных в одной катушке на каждом полюсе. Для любой обмотки $k_{об}$ может быть найден по векторной диаграмме ЭДС проводников (звезде пазовых ЭДС) как отношение геометрической суммы векторов ЭДС проводников, последовательно соединенных в фазу обмотки (ЭДС фазы), к алгебраической сумме ЭДС этих же проводников:

$$k_{об} = \left| \sum_{i=1}^n e_{\pi p i} \right| / (n e_{\pi p}),$$

где $e_{\pi p}$ — ЭДС эффективного проводника; n — число последовательных эффективных проводников обмотки.

Общим аналитическим выражением для расчета $k_{об}$ большинства современных симметричных обмоток с фазной зоной, равной электрическому углу π/m радиан, и с целым числом пазов на полюс и фазу (кроме некоторых видов специальных обмоток, например с несплошной фазной зоной и ряда других) является

$$k_{об} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m} - \nu\right)}{q \sin\left(\frac{\pi}{2mq} - \nu\right)} \sin\left(\frac{\pi}{2} \beta \nu\right), \quad (3.3)$$

где ν — номер гармоники ЭДС (для основной гармоники $\nu = 1$); q — число пазов на полюс и фазу; β — относительный шаг обмотки (укорочение или удлинение шага по сравнению с полюсным делением).

Для расчета и анализа обмоток $k_{об}$ удобно представлять в виде произведения коэффициента укорочения k_y на коэффициент распределения k_p :

$$k_{об} = k_y k_p. \quad (3.4)$$

Коэффициент укорочения. Он учитывает уменьшение ЭДС каждого витка по сравнению с алгебраической суммой ЭДС двух проводников, являющихся его сторонами, т.е. по сравнению с ЭДС витка при диаметральном шаге,

$$k_y = \sin\left(\frac{\pi}{2} \beta\right), \quad (3.5)$$

т.е. он зависит от относительного шага витка — его укорочения (или удлинения) по сравнению с полюсным делением машины: $\beta = y/\tau$.

В равнокатушечной обмотке, в которой все катушки имеют одинаковый шаг и одинаковое число витков, коэффициент укорочения обмотки будет равен коэффициенту укорочения витка, постоянному для всех витков обмотки. В обмотках с разными шагами катушек или с разным числом витков в катушках, например в концентрических или одно-двухслойных, укорочение витков разных катушек уже не будет одинаковым. Поэтому для расчета коэффициента укорочения фазы обмотки пользуются не действительным шагом катушек y , а расчетным $y_{расч}$, который для различных типов обмоток определяется следующим образом.

Для двухслойных обмоток, в которых шаги всех катушек по пазам одинаковы, т.е. для всех двухслойных обмоток, за исключением двухслойных концентрических, расчетный шаг равен реальному шагу катушек по пазам:

$$y_{расч} = y. \quad (3.6)$$

Для двухслойных концентрических обмоток расчетный шаг равен среднему шагу катушек в катушечной группе:

$$y_{расч} = (y_б + y_м)/2, \quad (3.7)$$

где $y_б$ и $y_м$ — шаги по пазам наибольшей и наименьшей катушек в катушечной группе.

Для одно-двухслойных обмоток, в которых часть катушек имеет удвоенное число витков по сравнению с остальными, расчетный шаг определяется в зависимости от числа таких катушек и от числа пазов на полюс и фазу:

$$y_{\text{расч}} = q(m - 1) + 2N_6, \quad (3.8)$$

где N_6 — число катушек с удвоенным числом витков в каждой катушечной группе.

В трехфазных машинах ($m = 3$) наибольшее распространение среди одно-двухслойных обмоток получили обмотки с одной большой катушкой (катушкой с удвоенным числом витков — $N_6 = 1$). Для таких обмоток выражение для определения расчетного шага упрощается:

$$y_{\text{расч}} = 2(q + 1). \quad (3.9)$$

Для всех однослойных обмоток со сплошной фазной зоной, которые наиболее часто применяют в трехфазных машинах, расчетный шаг постоянен и равен полюсному делению:

$$y_{\text{расч}} = \tau. \quad (3.10)$$

Из этого следует, что коэффициент укорочения однослойных обмоток со сплошной фазной зоной всегда равен единице ($k_y = 1$), несмотря на то, что отдельные катушки обмотки при $q > 1$ выполняют с шагами большими, меньшими или равными полюсному делению.

В общем случае коэффициент укорочения для всех перечисленных выше типов обмоток для любой гармоники

$$k_{yv} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \beta v\right). \quad (3.11)$$

Укорочение шага рассчитывают по шагу обмотки $y_{\text{расч}}$:

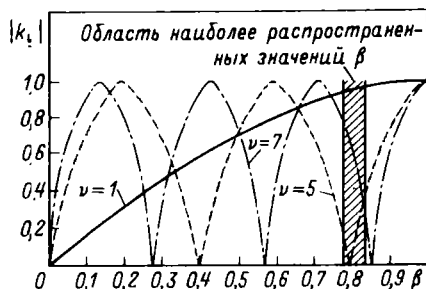
$$\beta = y_{\text{расч}}/\tau. \quad (3.12)$$

Расчетный шаг для различных типов обмоток определяют по (3.6)–(3.11).

На рис. 3.12 приведены кривые изменения k_y и показана область наиболее распространенных в практике значений укорочения ($\beta = 0,79 \div 0,83$), при которых достигают значительного уменьшения ЭДС пятой и седьмой гармоник ($v = 5$ и $v = 7$) при относительно малом уменьшении ЭДС первой гармоники. В практике почти все машины, кроме машин малой мощности, выполняют с обмоткой, имеющей укороченный шаг в показанных на рисунке пределах.

Следует отметить, что в отдельных случаях возникает необходимость применения обмоток с укорочением шага до $0,5\tau$, например в мощных

Рис. 3.12. Изменение коэффициента укорочения для различных гармоник в зависимости от β



двухполюсных машинах с обмоткой из жестких катушек. При укорочении $\beta \approx 0,8$ ширина катушек такой обмотки больше, чем внутренний диаметр статора, почти на двойную глубину паза и укладка их в пазы чрезвычайно затруднена, а в некоторых случаях просто невозможна. Чтобы избежать такого положения, обмотку выполняют с укорочением, близким к $\beta = 0,58 \div 0,63$, при этом ширина катушек уменьшается и обмотка может быть уложена в пазы.

Коэффициент распределения. Представим себе, что обмотка полюса электрической машины образована q катушками, стороны которых помещены в одних и тех же больших пазах (рис. 3.13, а). Кривая МДС такой сосредоточенной обмотки близка к прямоугольной, и помимо первой гармоники в ней присутствует целый спектр гармоник высших порядков. Если эти катушки расположить по одной в q соседних пазах, то кривая их МДС (рис. 3.13, б) будет представлять собой ступенчатую трапецию. Гармонический анализ показывает, что высшие гармоники в ней значительно менее выражены, чем в прямоугольной кривой. Однако суммарная ЭДС распределенной обмотки будет меньше, чем сосредоточенной. Оси распределенных в q соседних пазах катушек сдвинуты относительно друг друга на электрический угол $\alpha_z = 2\pi p/Z$ радиан. Векторы ЭДС сдвинуты между собой на этот же угол, поэтому суммарная ЭДС катушечной группы будет равна не алгебраической, а геометрической сумме ЭДС всех катушек, входящих в группу, т.е. $\underline{E}_{к.г} = |\Sigma \underline{E}_к|$ (рис. 3.14 а). Отношение $\underline{E}_{к.г}$ распределенной обмотки к расчетной ЭДС, равной произведению числа катушек на ЭДС каждой из них $qE_к$, называют коэффициентом распределения $k_p = \underline{E}_{к.г} / (qE_к)$.

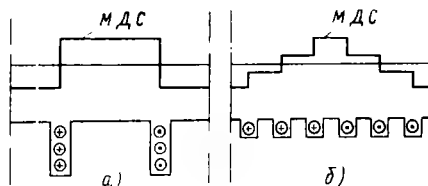


Рис. 3.13. Кривые МДС сосредоточенной и распределенной обмоток

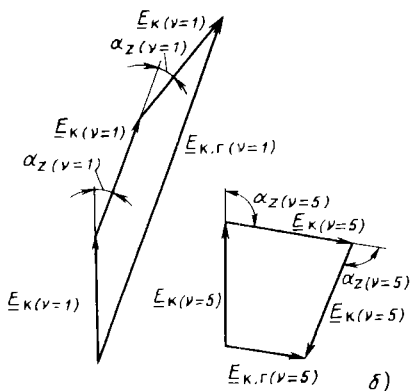
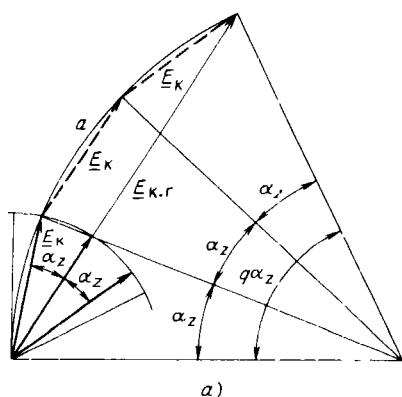


Рис. 3.14. К расчету коэффициента распределения обмотки:

a – векторная диаграмма ЭДС катушек при $q = 3$; b – ЭДС катушечной группы 1-й и 5-й гармоник

Из рис. 3.14 b видно, что коэффициент распределения для первой гармоники трехфазных машин равен:

$$k_p = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}} = \frac{0,5}{q \sin \frac{30^\circ}{q}}. \quad (3.13)$$

Для высших гармоник пазовый угол α_{zv} зависит от порядка гармоники:

$$\alpha_{zv} = \frac{2\pi p}{Z} \nu = \frac{\pi}{mq} \nu, \quad (3.14)$$

поэтому коэффициент распределения в общем случае при целом числе q для любой из гармоник

$$k_{pv} = \frac{\sin \left(\frac{\pi}{2m} \nu \right)}{q \sin \left(\frac{\pi}{2mq} \nu \right)} \quad (3.15)$$

Анализ этого выражения показывает, что при $q = 1$ для всех гармоник $k_p = 1$. С увеличением числа q коэффициент распределения уменьшается до определенных пределов, соответствующих абсолютному рав-

Таблица 3.16. Коэффициент распределения k_p трехфазных обмоток с фазной зоной 60°

Номер гармоник	Число пазов на полюс и фазу q					
	2	3	4	5	6	∞
1	<u>0,966</u>	<u>0,96</u>	<u>0,958</u>	<u>0,957</u>	<u>0,957</u>	<u>0,955</u>
5	<u>0,259</u>	<u>0,217</u>	<u>0,205</u>	<u>0,2</u>	<u>0,197</u>	<u>0,191</u>
7	<u>-0,259</u>	<u>-0,177</u>	<u>-0,158</u>	<u>-0,149</u>	<u>-0,145</u>	<u>-0,136</u>
11	<u>-0,966</u>	<u>-0,177</u>	<u>-0,126</u>	<u>-0,11</u>	<u>-0,102</u>	<u>-0,087</u>
13	<u>-0,966</u>	<u>0,217</u>	<u>0,126</u>	<u>0,102</u>	<u>0,092</u>	<u>0,073</u>
17	<u>-0,259</u>	<u>0,96</u>	<u>0,158</u>	<u>0,102</u>	<u>0,084</u>	<u>0,056</u>
19	<u>0,259</u>	<u>0,96</u>	<u>-0,205</u>	<u>-0,11</u>	<u>-0,084</u>	<u>-0,05</u>
23	<u>0,966</u>	<u>0,217</u>	<u>-0,958</u>	<u>-0,149</u>	<u>-0,092</u>	<u>-0,041</u>
25	<u>0,966</u>	<u>-0,177</u>	<u>-0,958</u>	<u>0,2</u>	<u>0,102</u>	<u>0,038</u>
29	<u>0,259</u>	<u>-0,177</u>	<u>-0,205</u>	<u>0,957</u>	<u>0,145</u>	<u>0,033</u>
31	<u>-0,259</u>	<u>0,217</u>	<u>0,158</u>	<u>0,957</u>	<u>-0,197</u>	<u>-0,051</u>
35	<u>-0,966</u>	<u>0,96</u>	<u>0,126</u>	<u>0,2</u>	<u>-0,957</u>	<u>-0,027</u>
37	<u>-0,966</u>	<u>0,96</u>	<u>-0,126</u>	<u>-0,149</u>	<u>-0,957</u>	<u>0,026</u>
41	<u>-0,259</u>	<u>0,217</u>	<u>-0,158</u>	<u>-0,11</u>	<u>-0,157</u>	<u>0,022</u>
43	<u>0,259</u>	<u>-0,177</u>	<u>0,205</u>	<u>0,102</u>	<u>0,145</u>	<u>0,042</u>
47	<u>0,966</u>	<u>-0,177</u>	<u>0,958</u>	<u>0,102</u>	<u>0,102</u>	<u>-0,020</u>

номерному распределению проводников обмотки по дуге полюсного деления ($q = \infty$). Уменьшение k_p происходит по-разному для различных гармоник. Как видно из табл. 3.16, для первой гармоники он уменьшается до значения $k_p = 0,955$, а для высших гармоник уменьшается значительно быстрее.

На рис. 3.14,б приведено графическое определение $E_{к.г}$ для первой и пятой гармоник при $q = 3$. Так как угол между векторами ЭДС пятой гармоники в 5 раз больше, чем для первой, сумма векторов ЭДС этой гармоники трех катушек, составляющих катушечную группу, будет значительно меньше, чем ЭДС первой гармоники.

Коэффициент скоса пазов. Для гармоник $v_Z = \frac{Z}{p} K \pm 1$ (для трехфазных машин $v_Z = 6qK \pm 1$), где $k = 1, 2, 3, \dots$, при $k = 1$ их порядок близок к цифре, выражающей число зубцов, приходящихся на пару полюсов машины, $v \approx Z/p$.

Такие гармоники называют гармониками зубцового порядка. Анализ выражений (3.11) и (3.15) показывает, что значения коэффициентов

укорочения и распределения этих гармоник будут такими же, как и для первой гармоники, при любых укорочениях и любом числе q (см. подчеркнутые значения в табл. 3.16). Это происходит потому, что электрические углы между векторами ЭДС зубцовых гармоник и первой гармоники отличаются на величину, кратную 2π :

$$a_{Z\nu} = a_Z (\nu = 1)^\nu = \frac{2\pi p}{Z} \left(K \frac{Z}{p} \pm 1 \right) = 2\pi K \pm a_Z (\nu = 1) .$$

Порядок зубцовых гармоник увеличивается с увеличением числа q , при этом соответственно уменьшается их амплитуда, а следовательно, и отрицательное влияние на работу машины. В малых машинах, в которых увеличение числа q затруднено, для подавления гармоник зубцового порядка выполняют скошенные пазы, т.е. пазы статора или ротора располагают не параллельно оси машины, а под некоторым углом к ней $\gamma_{ск}$, называемым углом скоса.

Скос пазов оценивают в линейных $b_{ск}$ или в относительных $\beta_{ск}$ размерах, показывающих, на сколько миллиметров или на какую часть зубцового деления по дуге окружности зазора изменено направление оси паза по сравнению с ее положением при нескошенных пазах (рис. 3.15).

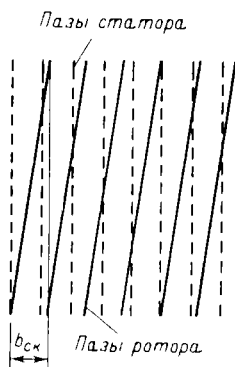
Центральный угол, который определяется дугой, равной $b_{ск}$, называется углом скоса и оценивается в электрических радианах:

$$\gamma_{ск\nu} = \nu b_{ск} \pi / \tau = \nu \beta_{ск} 2p / Z , \quad (3.16)$$

где $b_{ск}$ измеряется в миллиметрах, а $\beta_{ск} = b_{ск} / t_Z$ — в относительных единицах по сравнению с зубцовым делением.

Скос пазов уменьшает ЭДС, наводимую в витках обмотки. Это влияние учитывается коэффициентом скоса:

$$k_{ск\nu} = \frac{2 \sin \frac{\gamma_{ск\nu}}{2}}{\gamma_{ск\nu}} . \quad (3.17)$$



Обычно скос пазов выполняют в пределах одного пазового деления ротора. В этом случае $k_{ск}$ для основной гармоники близок к единице, но он уменьшается при увеличении порядка гармонических. Поэтому машины небольшой мощности с малым числом q , в кото-

Рис. 3.15. К понятию скоса пазов

рых влияние высших гармоник особенно заметно, в большинстве случаев выполняют со скошенными пазы.

Следует отметить, что скос пазов приводит к снижению уровня шума при работе машины, поэтому двигатели в малощумном исполнении всегда выполняют со скошенными пазы [5, 18, 28].

3.7. СХЕМЫ ОДНОСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Для того чтобы лучше понять принцип соединений в однослойных обмотках, сделаем некоторые построения для одной из простейших трехфазных обмоток с числом пазов $Z = 24$, числом полюсов $2p = 4$, числом параллельных ветвей $a = 1$.

На рис. 3.16 показаны 24 линии пазов, разделенные на 4 группы, соответствующие полюсным делениям ($\tau = Z/2p = 24/4 = 6$ пазовых делений). На каждом полюсном делении отметим пазы, в которых должны лежать стороны катушек, принадлежащие разным фазам. На этом и всех последующих рисунках, изображающих схемы обмоток машин переменного тока, стороны катушек, принадлежащих разным фазам, изображены различными линиями: первый фазы — толстой, второй фазы — двойной, третьей фазы — тонкой. Так как обмотка симметрична, то на каждом полюсном делении размещают одинаковое число сторон катушек разных фаз, равное числу пазов на полюс и фазу:

$$q = Z/(2pm) = 24/(4 \cdot 3) = 2. \quad (3.18)$$

Мгновенные направления токов показанные стрелками на рис. 3.16 в пределах одного полюсного деления (пазы 1–6), будут одинаковыми. В пазах соседних полюсных делений направление токов меняется на противоположное.

Рисунок 3.16 является как бы схемой активной (пазовой) части рассматриваемой обмотки. Лобовые соединения катушек должны быть выполнены так, чтобы направление токов в пазовых частях соответствовало показанному на рисунке. Их можно выполнить в нескольких вариантах, получив при этом тот или иной тип однослойной обмотки.

Рассмотрим схемы наиболее распространенных однослойных обмоток: обмоток с концентрическими катушками (концентрические обмотки) и равнокатушечных.

Однослойные концентрические обмотки. Схема одной из концентрических обмоток изображена на рис. 3.17, на котором сохранены принятые на рис. 3.16 нумерация пазов и условные обозначения катушек разных фаз различными линиями.

Однослойные концентрические обмотки характерны тем, что катушки, образующие каждую катушечную группу, охватывают одна другую. Катушки имеют различные шаги по пазам, поэтому их размеры различны. Наружные катушки в группе имеют большую ширину и длину, чем внутренние. Чтобы уменьшить их размеры, у половины катушек каждой

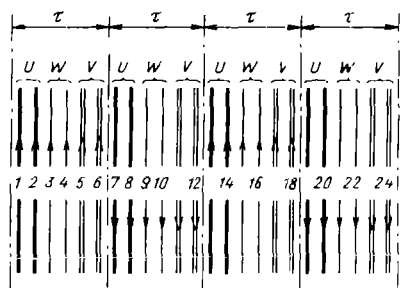


Рис. 3.16. К построению схем однослойных обмоток

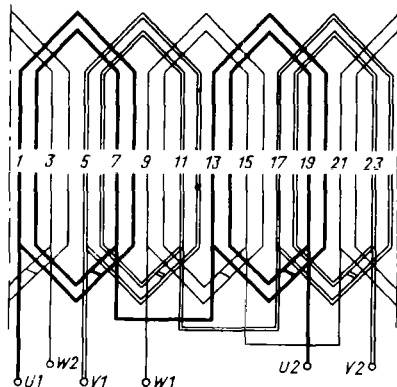


Рис. 3.17. Схема однослойной концентрической обмотки, $Z = 24$, $2p = 4$, $q = 2$, $a = 1$

катушечной группы изменяют направление отгиба лобовых частей, что приводит к уменьшению шага и некоторому уменьшению ширины и длины наружных катушек в группе. При этом катушечные группы получаются как бы "разваленные": у половины катушек в группе лобовые части отогнуты в одном направлении, а у второй половины – в другом. Такая обмотка получила название обмотки вразвалку (рис. 3.18).

В концентрической обмотке, выполненной вразвалку, в 2 раза уменьшается число катушек в каждой группе, но вдвое увеличивается число

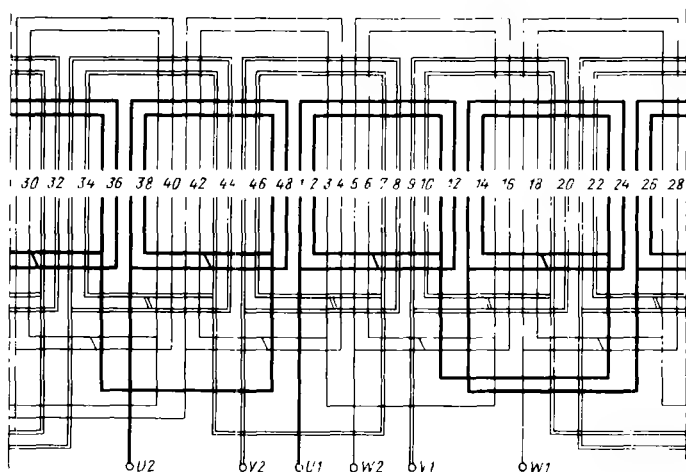


Рис. 3.18. Схема однослойной концентрической обмотки вразвалку, $Z = 48$, $2p = 4$, $q = 4$, $a = 1$

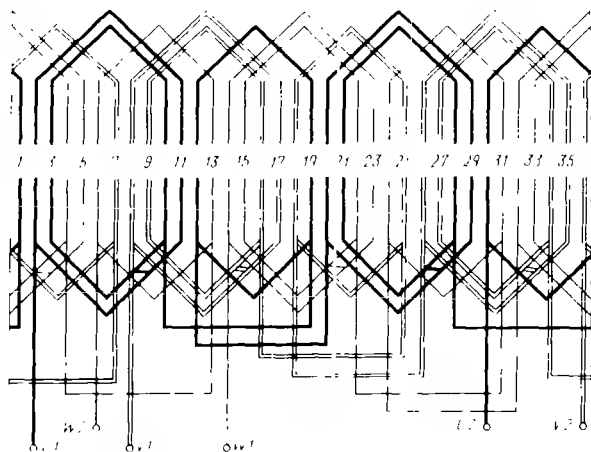


Рис. 3.19. Схема однослойной концентрической обмотки вразвалку, $Z = 36$, $2p = 4$, $q = 3$, $a = 1$

катушечных групп. Лобовые части катушек такой обмотки расположены по торцам статора более равномерно и компактно. Обмотку вразвалку применяют в большинстве машин с четным числом пазов на полюс и фазу. При нечетном q обмотку также можно выполнить вразвалку, но для этого приходится каждую катушечную группу подразделять на две подгруппы с разным числом катушек, лобовые части которых отогнуты в противоположные стороны. Например, при $q = 3$ лобовые части двух катушек в группе должны быть отогнуты в одном направлении и одной в противоположном (рис. 3. 9). Равномерность расположения лобовых частей несколько нарушается. Кроме того, возрастает сложность намотки и укладки обмотки. Поэтому концентрическую обмотку вразвалку при нечетном q применяют редко.

Иногда обмотку с нечетным числом q выполняют вразвалку с так называемой "расчесанной" катушкой: витки наибольшей катушки в группе разделяют в лобовых частях пополам и отгибают в разные стороны. Длина вылета лобовых частей и шаг катушек уменьшаются, но технология укладки таких обмоток возрастает, и встречаются они редко.

В машинах старых конструкций однослойные концентрические обмотки выполнялись и при высоком номинальном напряжении. Для них использовался многожильный провод "литца". Обмотки выполнялись впротяжку при почти полностью закрытых пазах статора. Лобовые части катушек разных групп располагались на разном удалении от торцов статора и в разных плоскостях: в концентрической обмотке - в двух, в обмотке, выполненной вразвалку, - в трех. Поэтому такие обмотки назывались двухплоскостные и соответственно трехплоскостные.

В современном электромашиностроении однослойные концентрические обмотки применяют только в машинах малой мощности. Их лобовые части после укладки в пазы собирают в сплошной жгут и бандажируют, однако названия обмоток – двухплоскостная и трехплоскостная – в технической литературе сохранились, так же как и способ изображения на схемах лобовых частей катушек соседних групп с разной длиной прямолинейных частей, т.е. в разных плоскостях (см. рис. 3.18).

Равнокатушечные обмотки. Необходимое направление токов в пазах машины (см. рис. 3.16) может быть получено и при других вариантах соединения пазовых частей катушек лобовыми, например в обмотке из катушек одинаковых размеров и конфигурации (рис. 3.20). Такие обмотки называют равнокатушечными. Из сравнения схем, изображенных на рис. 3.17 и 3.20, видно, что обмотки отличаются друг от друга только формой лобовых частей катушек. Формирование катушечных групп и последовательность их соединения остаются такими же, как и в обмотке с концентрическими катушками.

Равнокатушечная обмотка может быть выполнена также вразвалку (рис. 3.21), что приводит к тем же положительным результатам, как и в концентрической обмотке. Равнокатушечные обмотки в технической литературе часто называют шаблонными, а выполненные вразвалку – цепными.

На рис. 3.17–3.21 показаны однослойные обмотки четырехполюсных машин с полюсным делением $\tau = Z/(2p) = 24/4 = 6$ зубцовых делений. Катушки концентрической обмотки выполнены с шагами, равными 5 (меньшая) и 7 (большая) зубцовых делениям; равнокатушечная

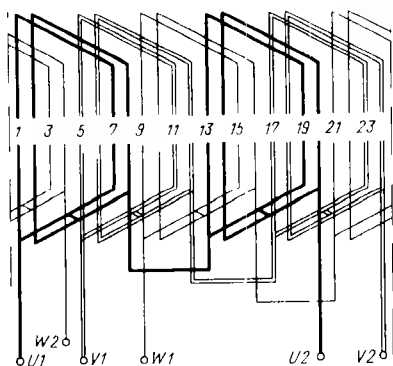


Рис. 3.20. Схема однослойной равнокатушечной обмотки. $Z = 24$, $2p = 4$, $q = 2$, $a = 1$

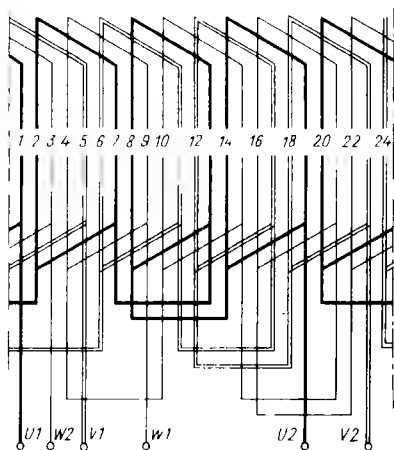


Рис. 3.21. Схема однослойной равнокатушечной обмотки вразвалку, $Z = 24$, $2p = 4$, $q = 2$, $a = 1$

обмотка вразвалку (рис. 3.21) выполнена с шагом по пазам, равным $y = 5$. Таким образом, в них нет катушек с диаметральной шагом, т.е. с шагом, равным полюсному делению $y = \tau = 6$. В то же время, построив векторную диаграмму (звезду пазовых ЭДС), можно убедиться, что обмоточные коэффициенты обмоток численно равны коэффициенту распределения, определенному по (3.13). Это является особенностью всех однослойных обмоток со сплошной фазной зоной. Поэтому при расчете обмоточного коэффициента таких обмоток принимают $k_y = 1$ независимо от шагов катушек (см. § 3.6).

Таким образом, в однослойных обмотках на амплитуду высших гармоник влияет только равномерность распределения катушек по пазам (число q), а не шаг самих катушек, что снижает возможность подавления высших гармоник в поле машины. Из-за этого, а в первую очередь из-за невозможности существенно уменьшить амплитуды 5-й и 7-й гармоник, однослойные обмотки применяют только в машинах малой мощности.

С несплошной фазной зоной могут быть выполнены, например, цепные обмотки. Для этого в каждой фазной зоне располагают стороны катушек не одной, а двух фаз. Коэффициент укорочения таких однослойных обмоток отличен от единицы, однако их выполнение встречает определенные технологические трудности, а при нечетном числе q приводит к несимметрии МДС магнитного поля машины. Поэтому их применение крайне ограничено.

В последние годы область применения однослойных concentрических обмоток несколько расширилась в связи с распространением станков для механизированной укладки обмотки. Большинство современных обмоточных станков, работающих по принципу втягивания катушек, рассчитано на укладку однослойных concentрических обмоток.

3.8. СХЕМЫ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Двухслойные обмотки применяют практически во всех машинах переменного тока, начиная с машин мощностью 15–16 кВт и кончая крупными турбо- и гидрогенераторами. Только некоторые уникальные турбогенераторы большой мощности с непосредственным охлаждением меди статора имеют однослойные обмотки. Но этот отход от общей тенденции связан со сложностью конструкции и особенностями схем обмоток крупных машин с малым числом полюсов.

Основным достоинством двухслойных обмоток является возможность использования укорочения шага для подавления высших гармоник в кривой ЭДС. Кроме того, двухслойные обмотки имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с однослойными, например по количеству возможных вариантов выполнения параллельных ветвей, дробного числа пазов на полюс и фазу, равномерности расположения лобовых частей катушек и др.

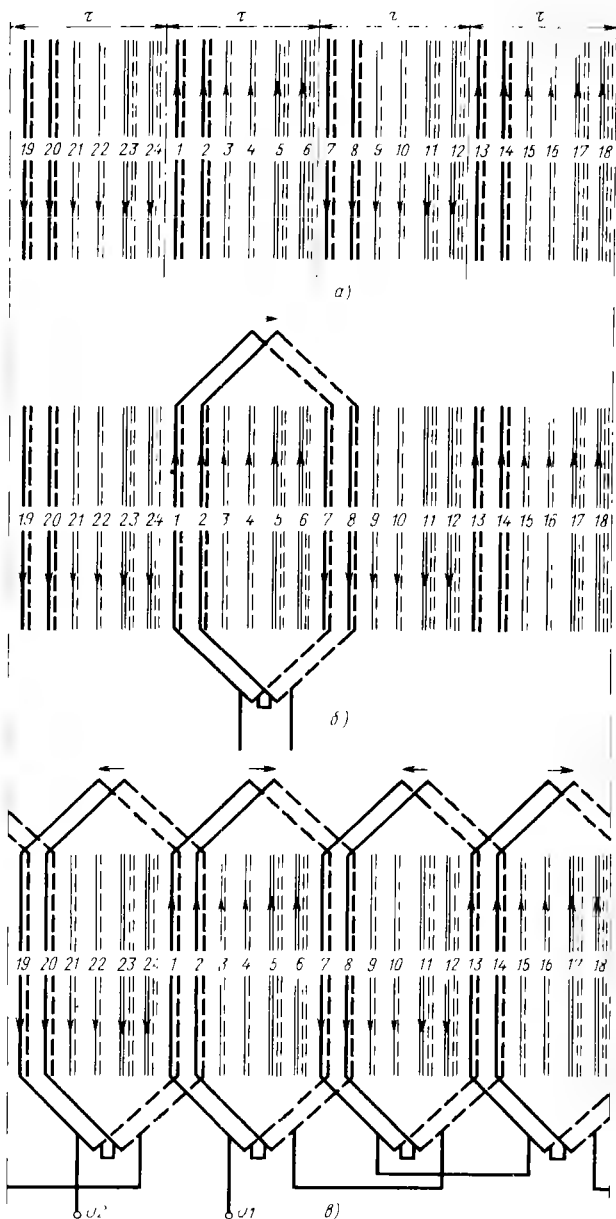


Рис. 3.22. К построению схем двухслойных обмоток:

а — распределение пазов по полюсным делениям; б — образование катушечной группы; в — соединение катушечных групп одной фазы обмотки

Принцип соединений в двухслойных обмотках легко проследить на примере построения одной из простейших схем. Составим схему обмотки статора трехфазной машины с $Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$. На рис. 3.22,а изображены 24 пары линий (сплошные и пунктирные), обозначающие верхние и нижние стороны катушек, лежащих в пазах, и разделенные на четыре полюсных деления. На полюсном делении на каждую фазу приходится по два паза, так как $q = 2$. Стрелками на сплошных линиях, соответствующих верхним сторонам катушек, показано мгновенное направление токов в катушках, одинаковое во всех фазах в пределах одного полюсного деления и изменяющееся на обратное при переходе к следующему, т.е. проделаны те же построения, что и в примере на рис. 3.16. Стрелки на пунктирных линиях, соответствующих сторонам катушек, лежащих в нижнем слое паза, не показаны. Направления токов в них зависят от шага обмотки.

Для наиболее простого случая при диаметральном шаге $y = \tau$ лобовые части соединяют стороны катушек, лежащие на расстоянии полюсного деления друг от друга. Это соединение показано на рис. 3.22,б для катушек, верхние стороны которых расположены в соседних пазах на полюсном делении и занимают одну фазную зону. В рассматриваемом примере таких катушек две, так как $q = 2$. Соединенные последовательно, они образуют одну катушечную группу фазы обмотки.

Всего катушечных групп в одной фазе двухслойной обмотки столько же, сколько полюсов. На рис. 3.22,в все катушки одной фазы соединены в катушечные группы, а группы — между собой. Для того чтобы направления мгновенных значений токов, отмеченные стрелками, сохранились, катушечные группы соединяют между собой встречно, т.е. конец первой группы с концом второй, начало второй с началом третьей и т.д. При этом направление обтекания током катушечных групп (показано стрелками над катушечными группами) при переходе от одного полюсного деления к другому меняется на обратное. Обмотки остальных фаз строят аналогично.

Особенность схемы — число катушечных групп в фазе равно числу полюсов при встречном включении следующих друг за другом в фазе катушечных групп — является закономерностью для всех двухслойных обмоток с 60-градусной фазной зоной.

На рис. 3.23 приведена полная схема обмотки с диаметральным шагом, $Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$. Начала фаз $V1$ и $W1$ взяты последовательно через $2q$ пазовых делений по отношению к началу первой фазы — $U1$, т.е. через число пазов, соответствующих электрическому углу 120° .

Любое укорочение шага или изменение числа q не меняет принципа построения схемы. При укороченном шаге меняется только ширина катушек (рис. 3.24). Все соединения, как междукатушечные, так и межгрупповые, остаются такими же. Сравнивая между собой схемы обмоток с диаметральным и укороченным шагами, следует отметить, что в первом случае в каждом из пазов размещены стороны катушек, принадле-

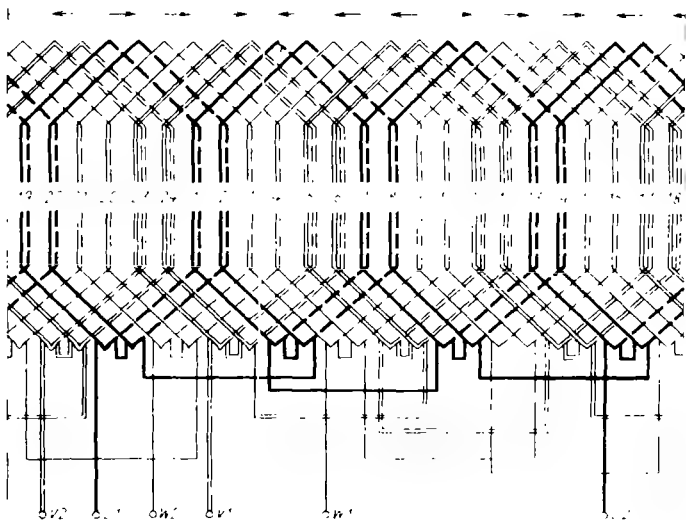


Рис. 3.23. Схема двухслойной обмотки с диаметральным шагом, $Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$, $y = \tau = 6$

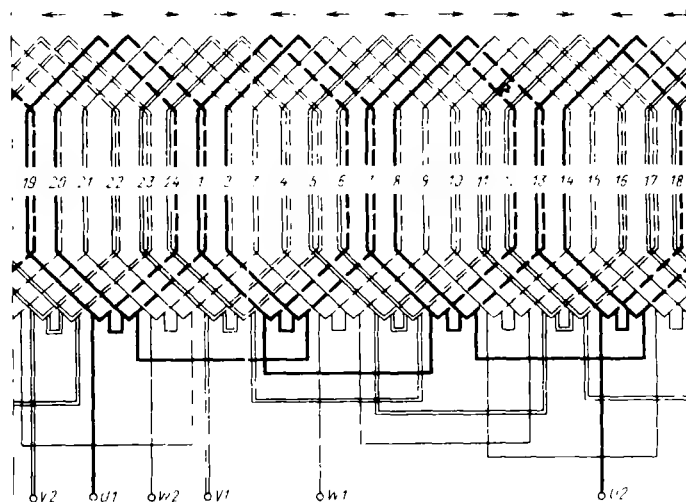


Рис. 3.24. Схема двухслойной обмотки с укороченным шагом, $Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$, $y = 5/6 \tau = 5$

жащих одной и той же фазе. При укорочении шага в части пазов размещают стороны катушек, принадлежащих разным фазам, например в пазах 2, 4, 6, 8 и др. (рис. 3.24). Относительное количество таких пазов по сравнению с пазами, занятыми сторонами катушек только одной фазы, зависит от принятого укорочения шага. С уменьшением β оно возрастает. Это является особенностью обмоток с укороченным шагом.

Дальнейший анализ схем двухслойных обмоток удобнее проводить с помощью так называемых условных схем, которые используют в технической литературе наряду с развернутыми и торцевыми. В таких схемах в отличие от развернутых используют условные обозначения не отдельных катушек, а целиком катушечных групп обмотки. Это является логическим продолжением принятого в развернутой схеме упрощенного изображения катушки одним контуром независимо от действительного числа витков в ней, так как все катушки в катушечной группе соединяют между собой только последовательно.

Рисунок 3.25,а является условной схемой обмоток, развернутые схемы которых изображены на рис. 3.23 и 3.24. В каждом прямоугольнике, обозначающем катушечную группу, выше диагонали проставлен порядковый номер катушечной группы (начиная с 1-й группы первой фазы) в последовательности расположения их по пазам статора. Ниже диагонали указано количество катушек в данной катушечной группе. Последняя запись введена, чтобы иметь возможность использовать условные схемы для обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу. На полях условной схемы конкретной обмотки должно быть указание о шаге обмотки, так как и при диаметральном, и при укороченном шагах условная схема одна и та же.

Для облегчения анализа схемы отметим стрелками над прямоугольниками, изображающими катушечные группы, направления обхода их витков током.

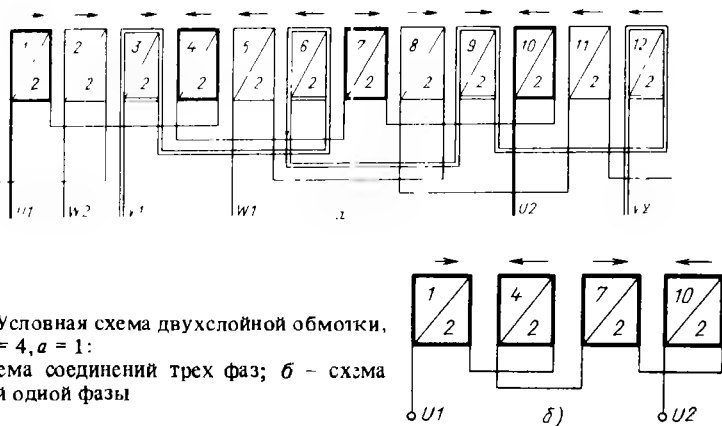


Рис. 3.25. Условная схема двухслойной обмотки, $Z = 24, 2p = 4, \alpha = 1$:

а — схема соединений трех фаз; б — схема соединений одной фазы

Из рис. 3.25,а видно, что соединения катушечных групп каждой фазы обмотки полностью идентичны, поэтому то же количество информации может быть представлено более компактно, т.е. изображением схемы только одной фазы обмотки при соответствующих надписях на чертеже (рис. 3.25,б).

Такие схемы ясно показывают специфику межгрупповых соединений в обмотке, практически формирующих нужную полюсность при заданном числе параллельных ветвей, и позволяют рассматривать не отдельные схемы обмоток машин с различными числами Z и q , а представлять их в виде типовых схем для любых Z при определенном числе полюсов.

Рассмотрим некоторые схемы двухслойных обмоток с различным числом параллельных ветвей. На рис. 3.26,а приведена условная схема обмотки двухполюсной машины (одной ее фазы), определяющая ее соединение при $a = 1$. При изменении числа параллельных ветвей полярность полюсов, образованных катушечными группами, не должна меняться, поэтому не должны менять своего направления и стрелки над прямоугольниками на схеме обмотки.

Обмотку двухполюсных машин можно выполнить и при $a = 2$. Условная схема такой обмотки ($2p = 2, a = 2$) показана на рис. 3.26,б. Как видно, межгрупповые соединения изменены таким образом, что катушечные группы образуют две параллельные ветви, но полярность полюсов остается прежней.

На рис. 3.25,б показана схема обмотки при $2p = 4, a = 1$, а на рис. 3.27,а приведена схема обмотки с тем же числом полюсов, но при $a = 2$. Полярность катушечных групп в обеих схемах одна и та же. На рис. 3.27,б дана схема той же обмотки, но при $a = 4$. Условия сохранения полярности катушечных групп соблюдены и при четырех параллельных ветвях.

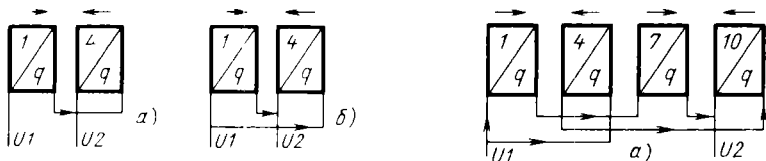


Рис. 3.26. Условные схемы соединений фазы обмотки с $2p = 2$ при различных числах параллельных ветвей:

а — при $a = 1$; б — при $a = 2$

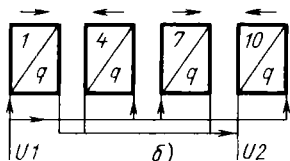
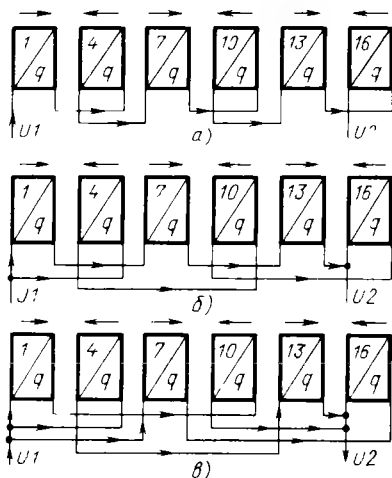


Рис. 3.27. Условные схемы соединений фазы обмотки с $2p = 4$ в несколько параллельных ветвей:

а — при $a = 2$; б — при $a = 4$

Рис. 3.28. Условные схемы соединений фазы обмотки с $2p = 6$ в несколько параллельных ветвей:

a при $a = 1$; b при $a = 2$; $в$ при $a = 3$



Аналогичные варианты схем обмоток при нескольких параллельных ветвях для обмотки шестиполюсной машины приведены на рис. 3.28. Для $a = 2$ и $a = 3$ возможны иные, чем приведенные на рисунке, варианты соединений, при которых полярность катушечных групп остается правильной.

Принцип построения схем обмоток с большими числами пар полюсов и другими возможными числами параллельных ветвей остается таким же и дальнейших пояснений не требует [4, 21].

3.9. ОБМОТКА С ДРОБНЫМ ЧИСЛОМ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Анализ выражения (3.15), определяющего коэффициент распределения, показывает, что амплитуда высших гармонических в кривой ЭДС обмотки зависит от угла между векторами ЭДС отдельных катушек. В обмотке с целым q этот угол всегда равен пазовому углу $\alpha_z = 2\pi p/Z = \pi/(mq)$, поэтому для уменьшения k_p высших гармоник необходимо увеличивать число q . Но с увеличением q растет число пазов и соответственно уменьшаются зубцовые деления, ширина зубцов и пазов. Это ограничивает наибольшие допустимые значения q , так как в узких пазах ухудшается заполнение паза медью и использование зубцовой зоны оказывается неэффективным, кроме того, ширина зубцов не может быть взята меньше предельной, определяемой их допустимой механической прочностью.

Как видно из табл. 3.16, заметное уменьшение k_p большинства высших гармоник происходит уже при $a = 3$, однако при этом, как показано в § 3.6, k_p для гармоник зубцовых порядков остается таким же, как и для основной гармоники. Чтобы повысить порядок зубцовых гармоник и тем самым уменьшить их амплитуду и влияние на характеристики машины, стремятся увеличить число пазов на полюс и фазу до 4–5 и более. Это легко достижимо в машинах с $2p = 2$ или 4. Для машин с $2p = 6$ или 8 при сравнительно небольших диаметрах статора выполне-

ние $q = 4 \div 5$ затруднено, а в машинах с большим числом полюсов, особенно в тихоходных с $2p = 30 \div 40$ и более, вообще невозможно, так как даже при $q = 4$ в таких машинах необходимо выполнить более 300—400 пазов.

В этих случаях для улучшения кривой поля в воздушном зазоре изменяют обмотку, в которой число катушек в катушечных группах не одинаково, а периодически меняется. При этом относительное положение векторов ЭДС катушек различных катушечных групп фазы изменяется по сравнению с обмоткой, в которой число катушек во всех группах постоянно, и угол между векторами ЭДС катушек после соединения схемы становится меньше α_z . Среднее число q при этом получается дробным, и обмотки называют "обмотками с дробным q ". Для того чтобы оценить преимущества применения обмоток с дробным q , проведем сравнение процессов формирования поля в машинах с целыми и дробными числами пазов на полюс и фазу.

На рис. 3.29 приведены схема-развертка первой фазы четырехполюсной обмотки с $q = 3$ и векторная диаграмма ЭДС катушек этой фазы. На окружности цифрами без штрихов обозначены номера пазов статора. Внутренний ряд цифр соответствует пазам, в которых лежат стороны катушек, образующие первую пару полюсов (двойное полюсное деление занимает электрический угол 360°), наружный ряд цифр — пазам второй пары полюсов.

Условимся, что вектор ЭДС первой от начала отсчета катушки направлен от центра диаграммы к отметке на окружности, соответствующей первому пазу, и присвоим этой катушке номер 1. Тогда векторы ЭДС всех последующих катушек обмотки будут направлены на отметки, соответствующие следующим номерам пазов согласно принятому порядку отсчета — по часовой стрелке.

В рассматриваемой схеме $\alpha_z = 180^\circ / (mq) = 180^\circ / (3 \cdot 3) = 20^\circ$. Согласно схеме обмотки три первые катушки ($q = 3$) образуют первую катушечную группу фазы U , и векторами их ЭДС будут векторы 1, 2 и 3. Далее по обходу окружности векторной диаграммы следуют векторы ЭДС катушек второй и третьей катушечных групп, принадлежащих фазе W , — векторы 4, 5, 6, и фазе V — векторы 7, 8 и 9. Векторы 10, 11 и 12 являются векторами ЭДС катушек четвертой катушечной группы, принадлежащей фазе U , а следующие за ними (13—18) — векторами пятой и шестой катушечных групп (фазы W и V). На этом обход первых двух полюсных делений заканчивается. При обходе следующего двойного полюсного деления картина полностью повторяется.

Первая и четвертая катушечные группы, принадлежащие фазе U , в схемах двухслойных обмоток с 60-градусной фазной зоной всегда включены встречно. Поэтому векторы катушек четвертой катушечной группы (10, 11 и 12) на векторной диаграмме должны быть повернуты на 180° . Повернутое положение этих векторов показано на диа-

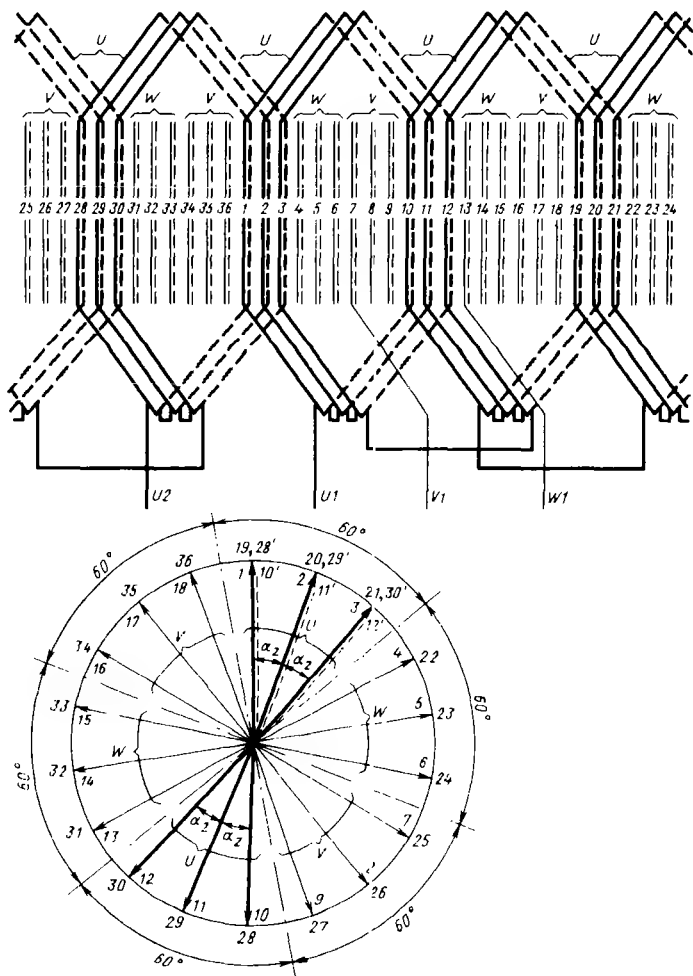


Рис. 3.29. Схема и векторная диаграмма ЭДС катушек фазы обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу, $Z = 36$, $2p = 4$, $a = 1$, $q = 3$

грамме пунктиром, а их номера обозначены прежними цифрами, но со штрихами ($10'$, $11'$, $12'$). Повернутые векторы полностью совпадают со сходными векторами ЭДС катушек первой катушечной группы. При обходе следующего двойного полюсного деления такое положение сохраняется. В общем случае совпадение векторов ЭДС сходных катушек, включенных встречно, катушечных групп одной фазы сохраняется при любом целом числе q , так как сходные катушки двух соседних

групп фазы всегда располагают по окружности зазора на расстоянии $3q$ пазовых делений, образующих центральный угол $\alpha = 3q = 180^\circ$.

Таким образом, в обмотках с целым q угол между векторами ЭДС катушек фазы после соединения обмотки определяется количеством катушек в катушечной группе, которое для всей обмотки постоянно и равно q . Следовательно, коэффициент распределения таких обмоток зависит только от числа q .

Следует также отметить, что в обмотках с целым q угол между векторами ЭДС катушек может быть определен на векторной диаграмме по положению векторов ЭДС первой катушечной группы, т.е. процесс формирования обмотки заканчивается после обхода одного полюсного деления по окружности зазора. При дальнейшем обходе векторы ЭДС всех остальных катушек фазы после соединения схемы совпадают со сходными векторами ЭДС катушек первой катушечной группы.

Обмотки с дробным q состоят из катушечных групп с разным числом катушек, поэтому сходные катушки двух соседних групп фазы располагают по окружности зазора на расстоянии, отличном от $3q$, т.е. не так, как в обмотках с целым q . Следовательно, центральный электрический угол между ними не будет равен 180° , и при встречном включении катушечных групп (при повороте векторов ЭДС катушек на 180° на векторной диаграмме) совпадения векторов ЭДС сходных катушек не произойдет.

Рассмотрим схему одной из простейших обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу [$Z = 30$, $2p = 4$, $m = 3$, $q = Z / (2pm) = 30 / (4 \cdot 3) = 2\frac{1}{2}$], развернутая схема одной фазы которой и векторная диаграмма ЭДС катушек этой фазы приведены на рис. 3.30.

Для расчета и анализа схем обмоток дробное число q обычно выражается неправильной дробью:

$$q = b + \frac{c}{d} = \frac{N}{d}, \quad (3.19)$$

где b — целая часть дробного q ; c — числитель дробной части q ; d — знаменатель дробной части q , называемый часто знаменателем дробности обмотки; N — числитель неправильной дроби, выражающей число q , причём $N = bd + c$.

Применяя эти обозначения для обмотки с $q = 2\frac{1}{2}$, можем записать: $b = 2$; $c = 1$; $d = 2$; $N = 2 \times 2 + 1 = 5$.

Обратим внимание на некоторые закономерности схемы, характерные для всех обмоток с дробным q . Катушечные группы не могут состоять из дробного числа катушек, поэтому числа катушек в группах подбирают таким образом, чтобы дробному q соответствовало среднее число катушек в катушечных группах. Для этого катушечные группы в обмотках с дробным q выполняют большими и малыми. В больших катушечных группах на одну катушку больше, чем в малых. Большие

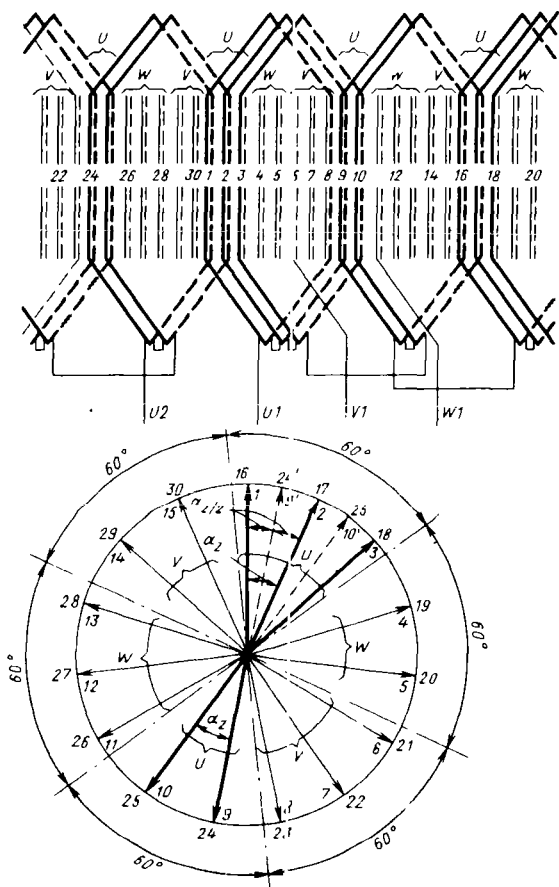


Рис. 3.30. Схема и векторная диаграмма ЭДС катушек фазы обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, $Z = 30$, $2p = 4$, $a = 1$, $q = 2\frac{1}{2}$

и малые катушечные группы чередуют между собой с определенной периодичностью.

Рассматриваемая обмотка состоит из равного числа больших и малых катушечных групп, содержащих соответственно по три и по две катушки каждая (в среднем по $2\frac{1}{2}$ катушки в группе). Число катушек в малых катушечных группах всегда равно b , а в больших $b + 1$. Чередование больших и малых групп вдоль зазора записывается рядом цифр, определяющих количество катушек в последовательно расположенных катушечных группах. Для рассматриваемого примера таким рядом будет

|32|32|32... Из этой записи следует, что первой от начала отсчета будет большая катушечная группа, состоящая из трех катушек, затем малая, состоящая из двух катушек, затем опять большая и т.д. Чередование имеет строго определенную для каждой обмотки периодичность. В данной обмотке в каждом периоде (периоды разделены вертикальными линиями) имеются по две катушечные группы и по $2 + 3 = 5$ катушек. В общем случае в дробных обмотках в каждом периоде чередования содержится по d катушечных групп и по N катушек. При этом условии среднее число катушек в группе за один период будет равно q , так как $N/d = q$.

На рис. 3.30, так же как и в разобранный ранее примере (см. рис. 3.29), толстыми линиями показаны векторы ЭДС фазы. В первой катушечной группе фазы содержатся три катушки (векторы 1, 2, 3). Далее по обходу окружности диаграммы следуют векторы ЭДС катушек второй катушечной группы, принадлежащие фазе W , их два (4 и 5). В третьей катушечной группе (фаза V) три катушки. Векторы их ЭДС на диаграмме 6, 7 и 8. Четвертая катушечная группа принадлежит фазе U и содержит две катушки, векторы их ЭДС 9 и 10. Далее по обходу следуют большая катушечная группа фазы W с тремя катушками (векторы 11, 12, 13) и малая фазы V (векторы 14 и 15). На этом обход двойного полюсного деления заканчивается.

При соединении схемы, как всегда в двухслойных обмотках, следующие друг за другом в фазе катушечные группы включают встречно. Для фазы U это первая и четвертая катушечные группы. Повернув на диаграмме векторы ЭДС четвертой катушечной группы на 180° (новые положения векторов показаны пунктиром, а их номера обозначены $9'$ и $10'$), убеждаемся, что в обмотке с дробным q их новое направление не совпадает с направлением векторов ЭДС катушек первой группы, как это было в обмотках с целым q . В данной обмотке при $q = 2\frac{1}{2}$ они занимают среднее положение, деля угол между векторами ЭДС катушек первой группы пополам. Действительно, между катушками 1 и 9 заключено восемь зубцовых делений, соответствующих центральному углу $8\alpha_z = 8 \times 24 = 192^\circ$, и после поворота вектора 9 на 180° образуется электрический угол $192 - 180 = 12^\circ$, равный $\alpha_z/2$. Таким образом, после соединения схемы векторы ЭДС катушек одной фазы в обмотке с $q = 2\frac{1}{2}$ располагаются со сдвигом между собой на электрический угол $\alpha_z/2$.

Если в обмотке знаменатель дробности числа q будет больше 2, например 4 или 5 и т.д., то электрический угол между сходными векторами последовательных катушечных групп фаз после соединения обмотки будет уменьшаться. В общем случае этот угол составляет

$$\alpha_z/d = \pi/(mqd) = \pi/(mN).$$

Поэтому выражение для коэффициента распределения обмоток с дроб-

ным q записывается следующим образом:

$$k_p = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m} \nu\right)}{N \sin\left(\frac{\pi}{2mN} \nu\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m} \nu\right)}{q d \sin\left(\frac{\pi}{2mqd} \nu\right)}, \quad (3.20)$$

где $N = bd + c = qd$ — числитель неправильной дроби, определяющей число q .

Следовательно, применив обмотку с дробным q , можно получить такое же значение k_p , т.е. такие же результаты, с точки зрения подавления высших гармонических, как и при увеличении числа пазов в машине. Это достоинство обмоток с дробным q привело к их широкому распространению в крупных тихоходных машинах переменного тока.

Следует отметить, что формула (3.20) является общей для расчета коэффициента k обмоток с целыми и дробными числами q , так как при целых q [см. (3.15)] знаменатель дробности обмоток $d = 1$ и $c = 0$.

Выбор знаменателя дробности d , от которого в основном зависит угол между ЭДС катушек фазы, определяется условиями симметрии обмотки и необходимым числом параллельных ветвей. Обмотка будет симметричной, если общее число катушечных групп фазы, равное $2p$, содержит целое число периодов чередования больших и малых катушечных групп. В каждом периоде содержится d катушечных групп, следовательно, условием симметрии будет кратность числа катушечных групп в фазе ($2p$) числу катушечных групп в периоде (d), т.е. $2p/d$ равно целому числу, при этом число катушек в фазе двухслойной обмотки, равное Z/m , будет кратно числу катушек в периоде N , так как

$$\frac{2p}{d} = \frac{2p \cdot mq}{d \cdot mq} = \frac{Z}{mN}$$

равно целому числу.

Параллельные ветви в обмотке с дробным q могут быть образованы только из катушечных групп, составляющих целое число периодов чередования, так как ЭДС отдельных катушечных групп сдвинуты между собой по фазе, а ЭДС больших и малых катушечных групп не равны по амплитуде. При этом условии допустимое число параллельных ветвей

$$a = 2p/(dk), \quad (3.21)$$

где k — любое целое число.

Максимально возможное число параллельных ветвей

$$a = 2p/d. \quad (3.22)$$

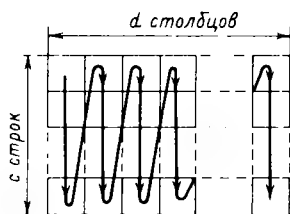


Рис. 3.31. К составлению таблиц чередования катушечных групп в обмотке с дробным q

При составлении схем обмоток, в которых числитель дробной части числа q равен $c = 1$ или $c = d - 1$, последовательность чередования больших и малых катушечных групп безразлична. Например, для обмоток с $q = 2/4$ может быть принято чередование $|2223|2223|$ или $|2232|2232|$ или любое другое, образованное перестановкой этих же цифр. Эти чередования отличаются друг от друга только выбором начальной катушки первой фазы и полностью равноценны.

В других случаях, когда $1 < c < (d - 1)$, например в обмотках с $q = 2^4/7$ или $q = 4^3/5$ и т.д., наиболее благоприятное с точки зрения симметрии обмотки чередование катушечных групп находят различными способами. Наиболее удобный из них заключается в следующем.

По значениям $q = b + (c/d)$ составляют таблицу, имеющую c строк и d столбцов (рис. 3.31). В клетки таблицы вписывают числа катушек в катушечных группах. Заполнение таблицы начинают с верхней левой клетки в последовательности, показанной на рис. 3.31 стрелками. Сначала в клетки вписывают числа катушек, содержащихся в больших катушечных группах. Этими цифрами заполняют столько клеток, сколько в периоде чередования содержится больших катушечных групп, т.е. c клеток — весь первый столбец. Продолжая заполнение таблицы в указанном порядке, вписывают в следующие клетки числа катушек, содержащихся в малых катушечных группах, столько раз, сколько их есть в периоде чередования, т.е. $d - c$. Далее опять вписывают числа катушек в больших катушечных группах, потом в малых и т.д. Вписывание продолжают в той же последовательности, пока все клетки таблицы не будут заполнены. Нужное чередование катушечных групп в периоде читают по строкам заполненной таблицы.

Для пояснения этого метода приведем пример определения возможных чередований больших и малых групп для обмотки с $q = 4^3/5$. В этой обмотке $b = 4, c = 3, d = 5$.

Составим таблицу, имеющую $c = 3$ строки и $d = 5$ столбцов. Каждый период чередования катушечных групп обмотки будет содержать $c = 3$ большие катушечные группы, состоящие из $b + 1 = 4 + 1 = 5$ катушек, и $d - c = 5 - 3 = 2$ малые группы, состоящие из $b = 4$ катушек каждая. Вписываем в клетки первого столбца, начиная с верхней, три (по числу больших катушечных групп) цифры 5 — число катушек в больших катушечных группах, заполняя весь первый столбец. Далее, начиная с верх-

ней клетки второго столбца, вписываем в две клетки (по числу малых катушечных групп в периоде) цифры 4 — число катушек в малых группах. Далее продолжаем запись, заполняя клетки таблицы в указанной последовательности:

5	4	5	4	5
5	4	5	5	4
5	5	4	5	4

По строкам таблицы читаем нужное чередование больших и малых катушечных групп. Все три строки таблицы показывают одно и то же чередование, изменяется только начало отсчета первой катушечной группы, следовательно, для построения обмотки можно взять любое из трех, например первую строку |54545|54545|. . . или вторую строку |54554|54554|. . .

Условные схемы обмоток с дробным q такие же, как и для обмоток с целым q . Меняются только числа, обозначающие количество катушек в катушечных группах, проставляемые под диагоналями в прямоугольниках. На рис. 3.32 приведена часть условной схемы обмотки с $q = 4\frac{3}{5}$. Цифры под диагоналями прямоугольников повторяют найденное в описанном примере чередование больших и малых катушечных групп.

В практике построения трехфазных обмоток с дробным q избегают применять знаменатель дробности, равный или кратный трем, так как в этом случае симметрия обмотки трехфазных машин нарушается. При необходимости применить обмотку со знаменателем дробности d , равным или кратным трем, следует провести более глубокий анализ возможных вариантов [12].

Начала фаз в обмотках с дробным q , так же как и в обмотках с целым q , должны быть выбраны через $120^\circ \cdot k$, т.е. через $120^\circ \cdot k/a_Z = 2 qk$ пазовых делений, где k — целое, не кратное трем, число. Однако при дробном q произведение $2 qk$ не при всяком k будет равно целому числу пазовых делений (за исключением обмотки, в которой $d = 2$).

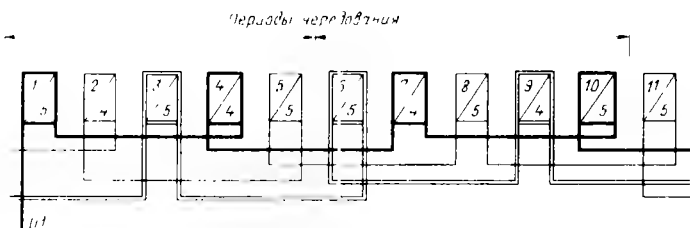


Рис. 3.32. Элемент условной схемы обмотки с $q = 4\frac{3}{5}$

Поэтому в обмотках с дробным q при определении положения начал фаз множитель k необходимо выбирать таким, чтобы произведение $2qk$ было равно целому числу, при этом k не должно быть кратным трем. Наименьшее возможное расстояние между началами фаз, выраженное в пазовых делениях, будет:

при d четном ($k = d/2$)

$$2qk = \frac{2N}{d} \cdot \frac{d}{2} = N; \quad (3.23)$$

при d нечетном ($k = d$)

$$2qk = \frac{2N}{d} d = 2N. \quad (3.24)$$

Отличия в выборе расположения начал фаз в обмотках с целым и дробным q в ряде методик по проектированию не отмечают и начала фаз ошибочно определяют со сдвигом на $2q$ пазовых делений для любых типов обмоток. В таких случаях в кривой МДС обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу образуется некоторая несимметрия.

3.10. СХЕМЫ ОБМОТОК ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ УКЛАДКИ

Современные обмоточные станки работают по принципу либо поочередной укладки каждого проводника обмотки в пазы статора по шагу обмотки, либо вытягивания в пазы с торца статора одновременно пучка проводников, принадлежащих одной или нескольким катушечным группам. И тот, и другой способы применимы только для обмоток, не требующих при укладке подъема шага, т.е. временного подъема из пазов сторон первых уложенных катушек. Кроме того, более прогрессивный способ укладки путем вытягивания катушечных групп с торца статора применим только для обмоток из concentрических катушек. Этому требованию полностью удовлетворяют однослойные concentрические обмотки. Двухслойные обмотки, схемы которых рассмотрены выше, требуют при укладке обязательного подъема шага. Поэтому в последние годы для механизированной укладки разработан ряд новых схем, при которых обмотки с сохранением их симметричности можно укладывать в пазы без подъема шага, как однослойные, и в то же время выполнять их с укорочением шага, как двухслойные. К наиболее распространенным видам таких обмоток относятся одно-двухслойные и двухслойные concentрические.

Одно-двухслойная обмотка представляет собой как бы сочетание катушек однослойной и двухслойной обмоток (рис. 3.33). В обычной двухслойной обмотке с укорочением шага при $\beta \geq 2/3$ в ряде пазов рас-

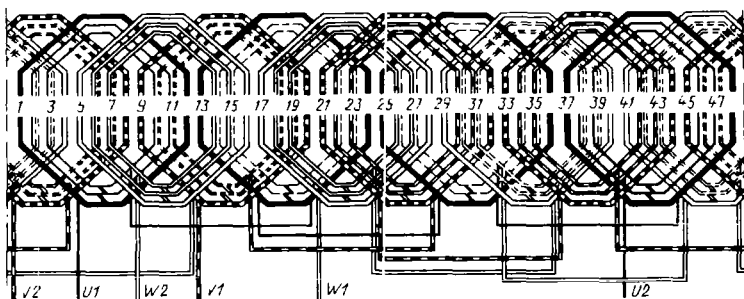


Рис. 3.33. Схема одно-двухслойной обмотки, $Z = 48$, $2p = 4$, $a = 1$, $q = 4$

полагают стороны катушек, принадлежащие одной и той же фазе (см., например, рис. 3.24 — пазы 1, 7, 13 и др.), а в других пазах размещены стороны катушек разных фаз. В одно-двухслойных обмотках в пазах, в которых расположены стороны катушек одной и той же фазы, помещают однослойную катушку (большую) с двойным числом витков. На схеме (рис. 3.33) такие катушки показаны линиями двойной толщины. В остальных пазах размещены в два слоя стороны малых катушек разных фаз. Обмотка выполняется концентрическими катушками. Число катушечных групп равно числу полюсов. В трехфазных обмотках катушечную группу (рис. 3.34) обычно выполняют из одной большой и $q - 2$ малых катушек (всего $q - 1$ катушка в группе). Шаг большой катушки равен $y_6 = \tau - 1$. Такая обмотка выполнима только при $q \geq 3$. При $q = 2$ она превращается в концентрическую однослойную обмотку, выполненную вразвалку.

Анализ векторных диаграмм пазовых ЭДС одно-двухслойной обмотки показывает, что ее обмоточный коэффициент, так же как и у двухслойных обмоток, можно представить в виде произведения $k_{об} = k_p k_y$. Коэффициенты распределения k_p и укорочения k_y рассчитывают по обычным для двухслойных обмоток формулам (3.11) и (3.13).

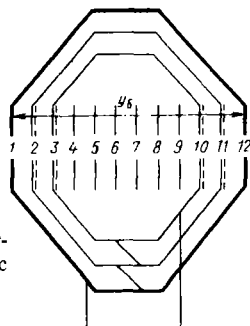


Рис. 3.34. Катушечные группы одно-двухслойной обмотки при $q = 4$; y_6 — шаг большой катушки (катушки с двойным числом витков)

Укорочение шага в одно-двухслойной обмотке определяют по расчетному шагу (3.8) и (3.9), и для трехфазных обмоток с одной большой катушкой в группе

$$\beta = y_{\text{расч}}/\tau = \frac{2}{3} \frac{q+1}{q} \quad (3.25)$$

Для обмоток с $q = 4$ и с $q = 5$ укорочение β соответственно равно 0,83 и 0,8, т.е. близко к укорочению шага, выполняемому в двухслойных обмотках.

Одно-двухслойные обмотки могут быть выполнены и с большим числом больших катушек в группе ($N_6 > 1$), однако в этом случае β увеличивается, поэтому такие обмотки применяют редко.

Следует отметить, что β в данной обмотке определяется только числом q и не может быть изменено. Это значение β используется как при расчете k_y , так и при определении коэффициентов k'_β и k_β , необходимых для расчета параметров электрических машин (см. гл. 8 и 9).

Двухслойная концентрическая обмотка (рис. 3.35) строится на базе обычной двухслойной обмотки с тем же числом $2p$ и q и отличается от нее соединениями в лобовых частях и шагом катушек. Катушечные группы в этой обмотке выполнены из концентрических катушек. Шаг наибольшей катушки равен числу пазовых делений между первой и последней сторонами катушек одной катушечной группы базовой двухслойной обмотки. Принцип построения обмотки ясен из сравнения схем, изображенных на рис. 3.35 и 3.24. Определенная последовательность укладки катушечных групп концентрической обмотки позволяет уло-

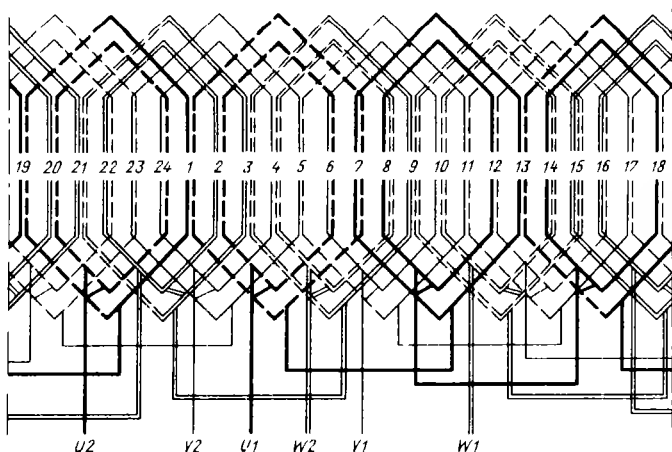


Рис. 3.35. Схема двухслойной концентрической обмотки, $Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$, $q = 2$

жить на обмоточном станке за несколько переходов всю обмотку без подъема шаговых сторон катушек.

Коэффициенты распределения и укорочения двухслойной концентрической обмотки рассчитывают по формулам (3.11) и (3.13). Следует отметить, что укорочение двухслойной концентрической обмотки, определенное по расчетному шагу (3.7) равно укорочению шага двухслойной обмотки, на базе которой она построена. Так, например, укорочение шагов обмоток, схемы которых приведены на рис. 3.24 и 3.35, одинаково и равно $\beta = 5/6$.

Катушечные группы уложенной на станке концентрической обмотки не полностью идентичны из-за различного положения сторон катушек в пазах. Это приводит к некоторому неравенству индуктивных сопротивлений различных катушечных групп. Поэтому двухслойная концентрическая обмотка может быть соединена в несколько параллельных ветвей только при условии, если в каждой из них будет содержаться одинаковое число катушечных сторон, расположенных в нижних и верхних слоях пазов. Это дополнительное условие несколько ограничивает возможность образования параллельных ветвей обмотки.

Концентрическая обмотка имеет несколько меньшие вылеты по сравнению с обычной двухслойной, что уменьшает среднюю длину витка, а следовательно, и массу обмоточной меди и осевую длину обмотанного статора.

3.11. ОСОБЕННОСТИ СХЕМ ОБМОТОК МНОГОСКОРОСТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статорах многоскоростных асинхронных двигателей применяют обмотки, которые могут быть включены на различное число полюсов. Частота вращения двигателя изменяется при этом ступенчато, обратно пропорционально числу полюсов обмотки. Изменения числа полюсов двигателя можно достичь двумя путями: установкой в пазы статора двух независимых друг от друга обмоток, выполненных на различные числа полюсов, или переключением схемы соединения катушечных групп одной обмотки. Обмотки, рассчитанные для такого способа переключения, называют полюсно-переключаемыми.

Укладка в статор двух независимых обмоток дает возможность получить любые соотношения между числами их полюсов и, следовательно, между частотами вращения двигателя. Недостатком такого способа является неполное использование объема паза статора, так как в пазы укладывают проводники двух обмоток, а двигатель работает на одной из них поочередно. Одна из обмоток во время работы двигателя отключается от сети, и занятая ею часть объема паза не используется. Это приводит к увеличению размеров пазов и всего двигателя по сравнению с односкоростным той же мощности.

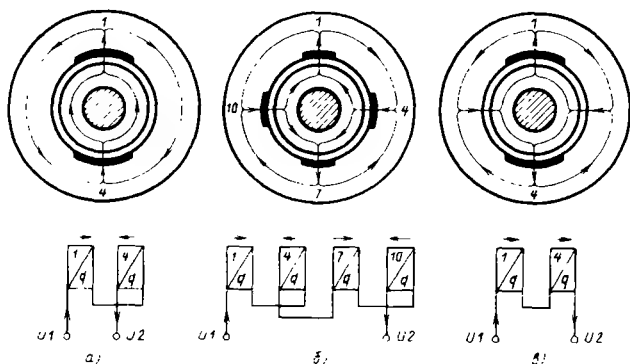


Рис. 3.36. Поток в магнитопроводе и условные схемы обмоток:

а - с двумя катушечными группами при $2p = 2$; *б* - с четырьмя катушечными группами при $2p = 4$; *в* - с двумя катушечными группами при $2p = 4$

Способ изменения числа полюсов в полюсно-переключаемых обмотках основан на изменении направлений магнитных потоков в машине путем переключения схемы обмотки. На рис. 3.36*а* схематично показано поперечное сечение статора и ротора двигателя и положение двух (1-й и 4-й) катушечных групп, принадлежащих первой фазе двухполюсной обмотки. Стрелками отмечено направление магнитных силовых линий потока машины. На схеме соединения катушечных групп этой фазы также стрелками показано направление обтекания их током, причем направление стрелки над катушечной группой вправо соответствует направлению силовых линий потока от центра, а влево — к центру. На рис. 3.36*б* такое же построение показано для четырехполюсной машины, одной фазе обмотки которой принадлежат 1, 4, 7 и 10-я катушечные группы. При встречном включении катушечных групп, т.е. при принятой в обычной двухслойной обмотке схеме, магнитное поле образует четыре полюса. Такую же картину поля можно получить и при двух катушках в одной фазе, если их включить не встречно, а согласно (рис. 3.36, *в*). Сравнивая направления силовых линий потоков и схемы обмоток, видим, что изменение направления тока в половине катушечных групп двухслойной обмотки приводит к изменению числа ее полюсов в 2 раза.

На этом принципе построены двухскоростные полюсно-переключаемые обмотки, в которых числа полюсов изменяются в 2 раза. Двухскоростные обмотки выполняют с шестью выводами. При работе на одном числе полюсов три вывода подключают к сети, а три оставшихся в зависимости от схемы обмотки либо замыкают накоротко, либо оставляют свободными. Обозначения выводов многоскоростных обмоток согласно ГОСТ 26772-85 приведены в табл. 3.17.

**Таблица 3.17. Обозначение выводов
многоскоростных двигателей, разработанных
после 1.01.1987 г. (по ГОСТ 26772-85)**

Число выводов	Наименование вывода фазы	Обозначение выводов	
		Начало	Конец
6	Первый	$1U-2N$	$2U$
	Второй	$1V-2N$	$2V$
	Третий	$1W-2N$	$2W$
9	Первый	$1U-3N$	$2U; 3U$
	Второй	$1V-3N$	$2V; 3V$
	Третий	$1W-3N$	$2W; 3W$
12	Первый	$1U-2N$	$2U$
		$3U-4N$	$4U$
	Второй	$1V-2N$	$2V$
		$3V-4N$	$4V$
	Третий	$1W-2N$	$2W$
		$3W-4N$	$4W$

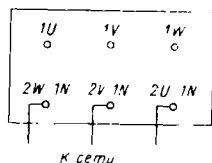
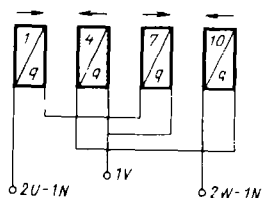
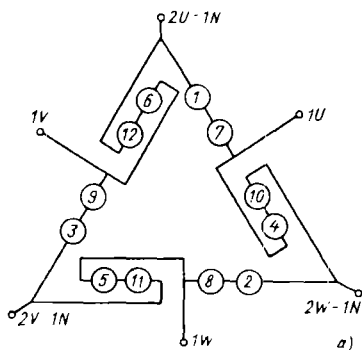
П р и м е ч а н и я: 1. В обозначениях раздельных обмоток двигателей, переключаемых на разное число полюсов, меньшая (большая) цифра, стоящая перед буквенным обозначением обмотки, соответствует меньшей (большей) частоте вращения.

2. Двойные обозначения (например, $1U-2N$; $1U-3N$ и др.) применяют для выводов, которые при одной частоте вращения присоединяют к сети, а при другой частоте вращения замыкают накоротко между собой. Если на доске выводов нет достаточно места для двойного обозначения, допускается не указывать вторую половину двойного обозначения с обязательным приложением к машине схемы соединений.

3. В чертежах электрических схем соединения с шестью выводными концами на свободном поле схемы при соединении фаз в треугольник допускается применение двойных обозначений ($U1W2$; $V1U2$; $W1V2$), при соединении фаз в звезду — обозначение начал фаз $U1$, $V1$, $W1$ и тройного обозначения ($U2$; $V2$; $W2$) точки звезды.

Выбор схемы полюсно-переключаемых обмоток зависит от того, должен двигатель работать на разных частотах вращения с постоянным моментом или с постоянной мощностью.

На рис. 3.37 показаны условные схемы включения двухскоростного асинхронного двигателя на $2p = 4/8$, рассчитанного на работу с одной и той же мощностью при $2p = 4$ и $2p = 8$. На высшей частоте вращения ($2p = 4$) его обмотку соединяют в треугольник при $a = 1$, а на низшей ($2p = 8$) — в звезду при $a = 2$. При том и при другом числе полюсов катушки обмотки остаются теми же самыми, поэтому их выполняют с шагом, равным или несколько большим полюсного деления при большем числе полюсов.

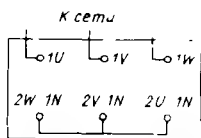
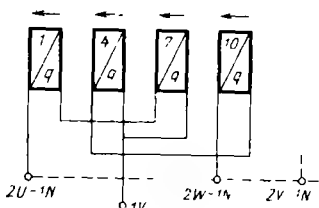


2p = 4, a = 1 соединение Δ

б)

Рис. 3.37. Схемы включения обмоток много-
скоростного асинхронного двигателя на $2p = 4/8$
при работе с постоянной мощностью:

а - схема соединений катушечных групп
обмотки; б - включение обмотки на $2p = 4$
при $a = 1$; в - включение обмотки на $2p = 8$
при $a = 2$



2p = 8, a = 2 соединение Δ

в)

В последние годы разработаны схемы обмоток двухскоростных двигателей, дающие возможность путем переключения катушечных групп изменять числа полюсов и в отношении, отличном от 1 : 2, с сохранением достаточно высокого обмоточного коэффициента для обеих частот вращения и числа выводных концов обмоток – не более шести [5, 23]. Особенность этих схем заключается в специфической компоновке катушечных групп из разновитковых катушек, при которой изменение точек подсоединения обмотки к питающей сети приводит не только к изменению полярности отдельных катушечных групп, но и к переключению групп между фазами или к отключению отдельных катушек при работе с одним из возможных чисел полюсов. При переключениях изменяется также и амплитуда МДС обмотки, поэтому такой метод построения схем называют методом "полусно-амплитудной модуляции" (ПАМ). Принцип переключений, характерный для данного метода, иллюстрируется схемой на рис. 3.38.

Рис. 3.38. Принципиальная схема двухскоростной обмотки, выполненной по принципу ПАМ:

1–9 элементы обмотки

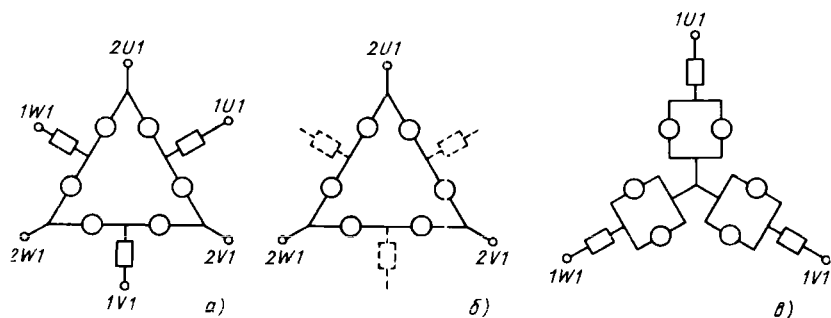
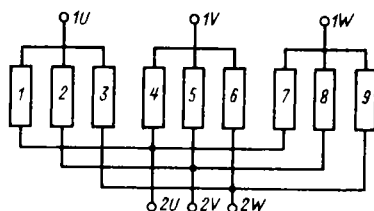


Рис. 3.39. Полусно-переключаемые обмотки, выполненные по схеме Харитонова:
 а - выводы обмотки; б - включение основной обмотки на $2p = 4$, $a = 1$; в - включение основной и дополнительной обмоток на $2p = 6$, $a = 2$. —○— элементы основной обмотки; —□— элементы дополнительной обмотки

Аналогичный принцип положен в основу построения двухскоростных полусно-переключаемых обмоток, выполненных по схемам Харитонова. Так, двухскоростные асинхронные двигатели серий 4А и АИ с высотами осей вращения 160–200 мм при соотношении чисел полюсов 6 : 4 имеют две обмотки: основную – двухслойную и дополнительную – однослойную, катушечные группы которых условно показаны на рис. 3.39, в соответственно кружками и прямоугольниками. Основная обмотка – полусно-переключаемая. При работе на $2p = 4$ включается только основная обмотка, соединенная треугольником при $a = 1$ (рис. 3.39, б). При работе двигателя на $2p = 6$ основная обмотка соединяется в звезду с двумя параллельными ветвями и последовательно с ней включается дополнительная обмотка (рис. 3.39, в).

Для трехскоростных и четырехскоростных асинхронных двигателей используют оба принципа изменения чисел полюсов: устанавливают две независимые обмотки, каждая из которых (в четырехскоростных) или одна из них (в трехскоростных двигателях) выполняется полусно-переключаемой. В обмотках в большинстве случаев используют более простые схемы переключения числа полюсов в отношении 1 : 2. Так, например, трехскоростные двигатели 4А112М6/4/2 имеют две независимые обмотки, одна из которых рассчитана на 6 полюсов, а вторая (полусно-

переключаемая) — на 2 и 4 полюса; в четырехскоростных двигателях 4А180М12/8/6/4 обе обмотки полюсно-переключаемые: одна на 12 и 6 полюсов, другая на 8 и 4 полюса.

3.12. ОБМОТКИ ФАЗНЫХ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

По своей конструкции и схемам соединения обмотки фазных роторов асинхронных двигателей отличаются от обмоток статоров машин переменного тока. В роторах машин мощностью до 80–100 кВт обычно применяют катушечные обмотки.

Конструктивно катушечные обмотки фазных роторов отличаются от статорных только расположением лобовых частей и наличием на них бандажей. В схемах отличие состоит в выборе начал фаз обмотки. Если расстояние между началами фаз обмотки статора выбирается минимально возможным для обеспечения большей компактности расположения выводных концов, то в обмотке ротора их стремятся расположить равномерно по окружности, чтобы облегчить балансировку обмотанного ротора.

С увеличением размеров машины уменьшается число витков в обмотке статора. Соответственно должно уменьшиться и число витков обмотки ротора, так как иначе напряжение на контактных кольцах возрастает, что может послужить причиной пробоя изоляции во время пуска машины. Поэтому в машинах больших габаритов обмотку ротора выполняют стержневой, имеющей всегда два эффективных проводника в пазу. Число витков в обмотке ротора при этом уменьшается, а ток ротора возрастает. Поэтому обмотку выполняют из прямоугольной меди или медных шин с площадью поперечного сечения, много большей, чем сечение проводников обмотки статора.

Стержневую обмотку ротора, как правило, делают волновой, так как в волновой обмотке меньше межгрупповых соединений, которые технологически трудновыполнимы при большом сечении проводников.

Основные закономерности соединений схем волновых обмоток фазных роторов рассмотрим на следующем примере. Составим схему стержневой волновой обмотки ротора, имеющего число пазов $Z_2 = 24$ и число полюсов $2p_2 = 4$. На рис. 3.40,а показаны 24 линии пазов, в которых расположены проводники верхнего слоя обмотки. Разметим эти пазы по фазам, предварительно определив полюсное деление $\tau_2 = Z_2/2p_2 = 24/4 = 6$ пазовым делением и число пазов на полюс и фазу $q_2 = Z_2/(2p_2 m_2) = 24/(4 \cdot 3) = 2$. Стрелками на линиях укажем для первой фазы направления мгновенных значений токов в стержнях (одинаковые в пределах каждого полюсного деления и изменяющиеся на обратные при переходе на соседние полюсные деления) и начнем построение схемы обмотки, приняв за начало первой фазы ($K1$) верхний стержень, лежащий в первом пазу.

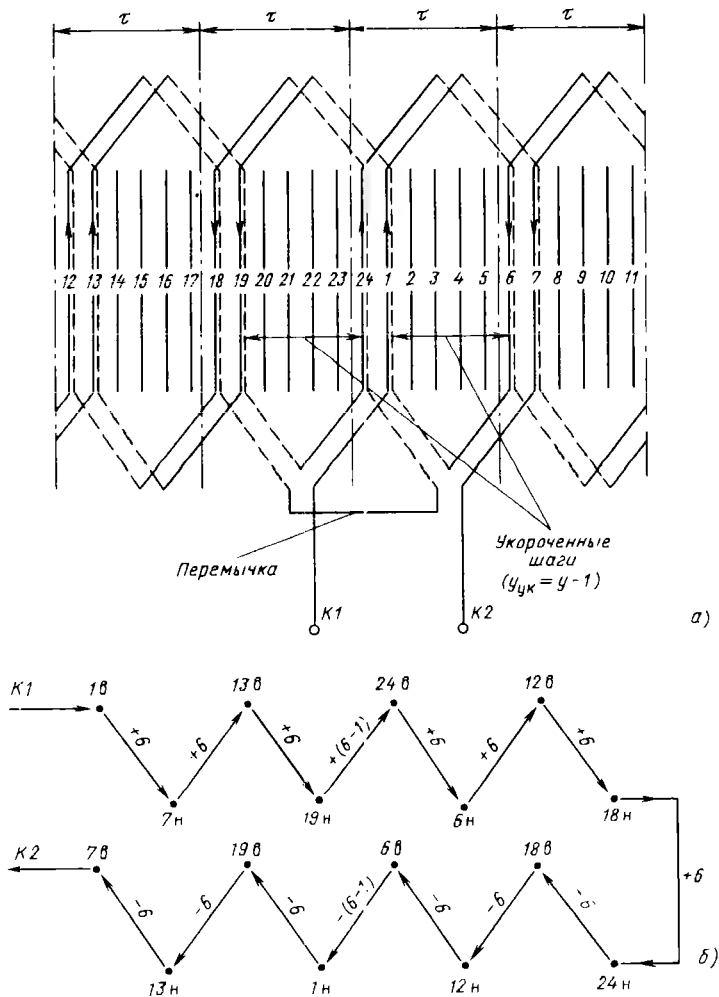


Рис. 3.40. К построению схемы стержневой волновой обмотки фазного ротора асинхронного двигателя, $Z = 24$, $2p = 4$:

a — схема соединений одной фазы; b — последовательность соединения стержней

Обмотку выполняют с диаметральной шаг. В данной схеме шаг обмотки по пазам $y = \tau_2 = 6$ зубцовых делений. Обмотка двухслойная, поэтому верхний стержень из паза 1 должен быть соединен с нижним стержнем пара $1 + y = 1 + 6 = 7$. Далее нижний стержень паза 7 соединяет-

ся с верхним стержнем паза $7 + y = 7 + 6 = 13$ и т.д. Одновременно с вычерчиванием схемы целесообразно записывать последовательность шагов обмотки (рис. 3.40,б).

Проделав таким образом $2p_2 - 1 = 4 - 1 = 3$ шага, убеждаемся, что при следующем — четвертом (по числу полюсов) шаге обмотка замкнется сама на себя, так как $2p_2\tau_2 = Z_2$. При построении схемы этот шаг укорачивают или удлиняют на одно зубцовое деление, т.е. делают его равным $y - 1$ или $y + 1$. Чаше встречаются схемы с укороченными переходными шагами, так как они приводят к некоторой экономии меди обмотки. При удлиненном шаге возникают дополнительные перекрещивания лобовых частей верхнего и нижнего слоев у выхода стержней из пазов.

Укороченным (или удлиненным) шагом завершается первый обход обмотки по окружности ротора. После q_2 таких обходов (в рассматриваемом примере — после двух обходов) изменение последнего шага производить нельзя, так как это приведет обмотку данной фазы к стержням соседней. Для соединения оставшихся после первых q_2 обходов стержней фазы последний стержень, на котором закончился обход, соединяют перемычкой со стержнем, занимающим такое же положение в пазу на расстоянии шага от него в направлении обхода, т.е. нижний стержень пазов 18 соединяют с нижним стержнем пазов $18 + 6 = 24$. Далее продолжают обход в том же порядке, но изменив его направление. Построение обмотки заканчивается после q_2 обходов в обратном направлении.

Начала других фаз обмотки располагают симметрично через $2q_2p_2$ пазовых делений, т.е. через $1/3$ окружности ротора (см. § 3.5).

Полная схема обмотки, построение которой начато в примере на рис. 3.40, приведена на рис. 3.41. За начала фаз приняты верхние стержни, расположенные в пазовых делениях 1, 9 и 17. Рассмотренная обмотка является типичной для стержневых волновых обмоток фазных роторов асинхронных двигателей.

Отметим некоторые особенности обмоток данного типа. В стержневой волновой обмотке имеется только по одной перемычке на фазу независимо от числа полюсов, в то время как в катушечных двухслойных обмотках таких перемычек — межгрупповых соединений — необходимо установить $2p - 1$ на каждую фазу. Это обстоятельство существенно облегчает соединение схемы, особенно в многополюсных машинах.

При симметричном расположении начал фаз так же симметрично располагают перемычки и концы фаз. Если за начала фаз приняты верхние стержни пазов, то концами фаз также будут верхние стержни, а перемычки соединяют с нижними стержнями.

Находят применение также некоторые модификации рассмотренных схем обмоток роторов. Иногда в схемах выполняют укороченные переходные шаги по обходу ротора в одну сторону и удлиненные — в другую. В таких схемах перемычки смещаются на несколько пазовых делений,

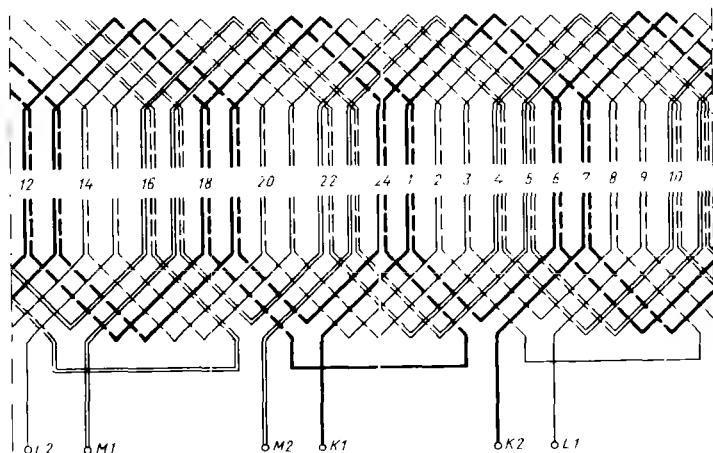


Рис. 3.41. Схема стержневой волновой обмотки фазного ротора, $Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$

поэтому конструктивно выводные концы фаз не пересекаются с перемычками, что облегчает крепление лобовых частей.

Распространены также схемы обмоток фазных роторов, выполняемых без перемычек. В таких обмотках в каждой из фаз на месте последнего при прямом обходе стержня, который в обычных схемах соединяют с перемычкой (см., например, на рис. 3.41 нижние стержни в пазах 2, 10, 18), устанавливают изогнутый переходной стержень. На схеме одной фазы обмотки без перемычек (рис. 3.42) переходной стержень размещен в 26-м пазу (отмечен кружком на схеме). Переходной стержень изгибается так, что одна половина его по длине находится в нижнем слое паза, а другая — в верхнем. Обе лобовые части стержня отгибают в одну и ту же сторону. После установки переходного стержня направление обхода меняется на обратное так же, как после установки перемычек в рассмотренных ранее схемах. В такой обмотке концы фаз располагают на противоположной от начал фаз стороне ротора.

Отсутствие перемычек упрощает конструкцию обмоток и технологию соединения схемы. Расположение начал и концов фаз на разных торцах ротора облегчает установку выводных концов и соединительной шины на конечных выводах обмотки для соединения ее в звезду. В то же время наличие переходных, изогнутых по длине стержней требует их дополнительного крепления в пазах (рис. 3.43).

Волновую стержневую обмотку выполняют с одной и, реже, с двумя параллельными ветвями. Образование большего числа параллельных ветвей технологически сложно. Для получения двух параллельных ветвей перемычку между половинами фаз убирают и каждую часть обмот-

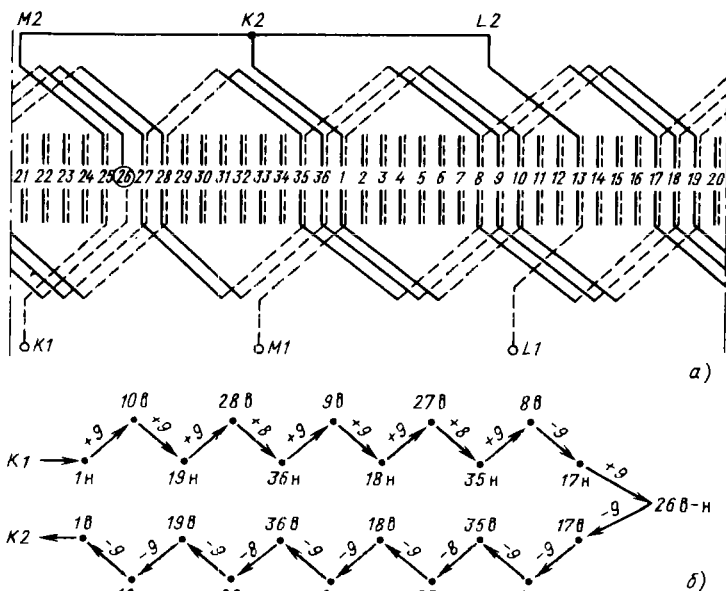


Рис. 3.42. Схема (а) и последовательность соединения (б) одной фазы стержневой волновой обмотки фазного ротора с переходным стержнем, $Z = 36$, $2p = 4$

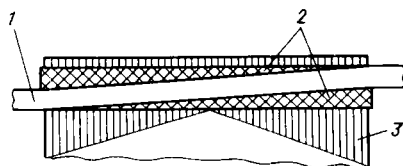


Рис. 3.43. Положение переходного стержня в пазу ротора:

1 — переходный стержень; 2 — уплотняющие клинья; 3 — сердечник ротора

ки соединяют с начальным и конечным выводами фаз, сохраняя в них направление тока.

В большинстве случаев стержневые волновые обмотки роторов выполняют с целым числом пазов на полюс и фазу. Однако на практике встречаются обмотки и с дробным q_2 . При $q_2 = b + c/d$ полюсное деление $\tau_2 = m_2 q_2$ содержит дробное число пазовых делений (обмотки с d , кратными трем, в трехфазных машинах не применяют) и шаг обмотки не может быть выполнен диаметрально. Такие обмотки выполняют с различными шагами: большими, равными $y' = \tau_2 + \epsilon_1$ пазовых делений, и малыми, равными $y'' = \tau_2 - \epsilon_2$ пазовых делений, где ϵ_1 и ϵ_2 — наименьшие дробные числа, при которых y' и y'' выражаются целыми числами. Коли-

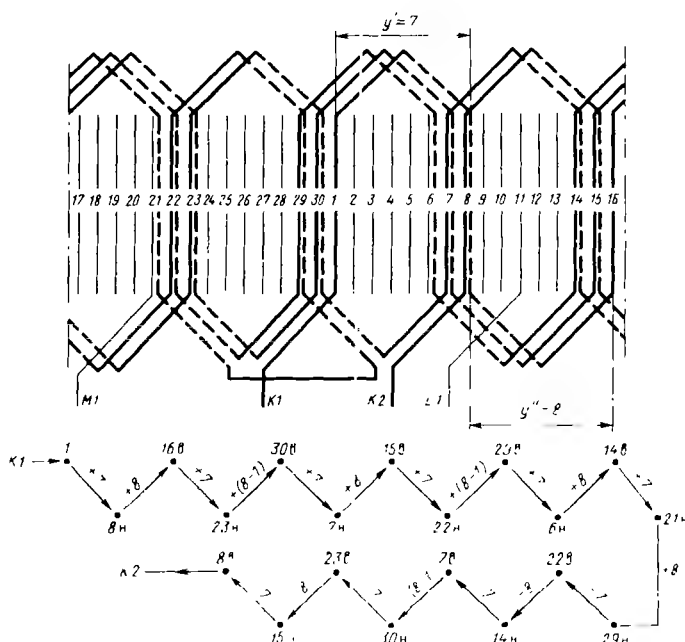


Рис. 3.44. Схема и последовательность соединения одной фазы стержневой волновой обмотки фазного ротора, $Z = 30$, $2p = 4$, $q = 2 \frac{1}{2}$

чество больших и малых шагов, а также последовательность соединений стержней в схеме зависят от числа q_2 и находятся аналогично числу и чередованию больших и малых катушечных групп в двухслойных катушечных обмотках с дробным q . Наиболее часто дробные обмотки фазных роторов выполняют при знаменателях дробности $d = 2$, т.е. с $q_2 = 2 \frac{1}{2}$; $3 \frac{1}{2}$ и т. п. В таких обмотках большие шаги равны $y' = \tau + 1/2$, а малые $y'' = \tau - 1/2$ пазовых делений. Схему обмотки строят так же, как и при целом q_2 , но большие шаги чередуют с малыми. Последовательность чередования шагов до перемычки и после изменяется на обратную.

На примере схемы обмотки с $q_2 = 2 \frac{1}{2}$, приведенной на рис. 3.44, видно, что две (прямая и обратная) ветви обмотки располагают таким образом, что в каждой фазной зоне занято стержнями фазы $q_2 = 2 + 1/2$ паза (три верхние половины паза и две нижние либо наоборот). В оставшейся свободной половине паза размещают стержень, принадлежащий соседней фазе [23].

3.13. КОНСТРУКЦИЯ И ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основным элементом якорных обмоток машин постоянного тока является секция, в которой может быть один или несколько витков. Выводные концы каждой секции соединены с пластинами коллектора. Несколько секций, пазовые стороны которых размещают в одном слое паза, имеют общую корпусную изоляцию и образуют катушку обмотки. Катушка обмотки якоря в отличие от катушки обмотки статора машины переменного тока имеет столько пар выводных концов, сколько секций она имеет в своем составе (рис. 3.45).

В большинстве машин общего назначения мощностью до 30—40 кВт обмотки выполняют из круглого, а в машинах большей мощности — из прямоугольного обмоточных проводов. Обмотки из круглого провода укладывают в полузакрытые пазы (рис. 3.46, а). Плотность укладки проводников оценивается коэффициентом заполнения паза (см. § 3.4).

Пример исполнения изоляции обмоток из круглого провода приведен в табл. 3.18. Корпусная изоляция пазовой части катушек выполнена пазовым коробом из одного или двух слоев изоляционного материала. Для повышения надежности короба в местах выхода его из пазов по торцам якоря он завернут в виде манжеты. Прокладки между слоями

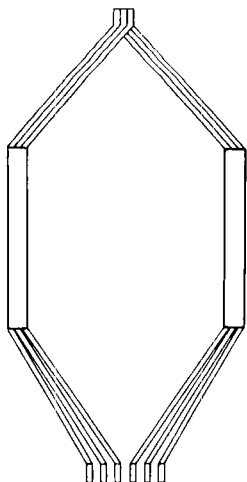


Рис. 3.45. Катушка обмотки якоря машины постоянного тока, состоящая из трех секций

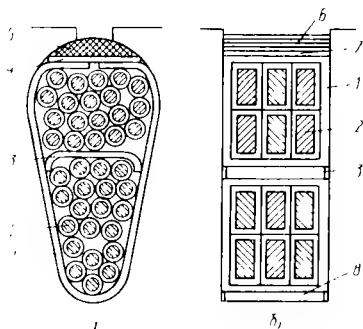
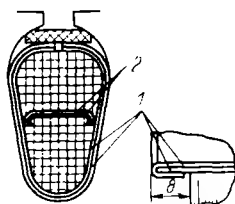


Рис. 3.46. Поперечный разрез пазов якоря:

а — с обмоткой из круглого провода; б — с обмоткой из прямоугольного провода; 1 — корпусная изоляция; 2 — проводники обмотки; 3 — прокладка между слоями обмотки; 4 — прокладка под клин; 5 — пазовый клин; 6 — проволоочный бандаж; 7 — прокладка под бандаж; 8 — прокладка на дно паза

Таблица 3.18. Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока (пазы овальные полузакрытые; обмотка двухслойная вспыная из круглого эмалированного провода; напряжение до 600 В)



Высота оси вра- щения <i>h</i> , мм	Пози- ция	Материал		Тол- щина, мм	Число слоев	Односто- ронняя тол- щина изоля- ции, мм
		Класс нагревостойкости				
		В	Ф и Н			
80-112	1	Изофлекс	Имидофлекс	0,35	1	0,35
	2	"	"	0,35	1	0,35
132-200	1	"	"	0,25	2	0,5
	2	"	"	0,25	2	0,5

Примечание. Прокладку между катушками в лобовых частях обмотки выполняют из изофлекса.

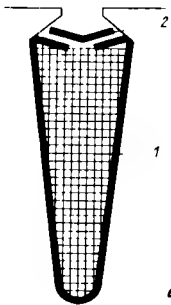
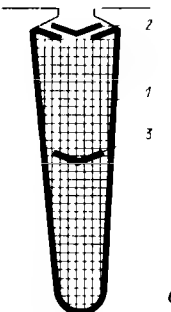
обмотки в пазу выполнены из того же материала, что и корб. В лобовых частях секции и катушки дополнительно не изолируют.

В табл. 3.19 показано исполнение изоляции обмоток якоря двигателей 4П100 и 4ПФ132. Обмотки рассчитаны на механизированную укладку. Проводники закреплены в пазах пазовыми крышками, выполненными из того же материала, что и корб.

В обмотке из прямоугольного провода проводники располагают своей широкой стороной параллельно боковой грани паза (рис. 3.46,б), причем проводники одной секции укладывают друг над другом, а пазовые стороны секций, составляющих одну катушку, – в одном по высоте слое паза; в верхнем или в нижнем. Подобное расположение принято для выравнивания индуктивного сопротивления секций, принадлежащих одной катушке, так как оно существенно зависит от размещения проводников по высоте паза.

Число витков в секции обмотки из прямоугольного провода обычно не превышает одного-двух, реже -- трех или четырех витков. Одновитковые секции могут быть выполнены стержневыми, что облегчает их укладку в пазы, но делает необходимой дополнительную операцию – пайку головок стержней друг с другом после укладки обмотки. Секции

Таблица 3.19. Изоляция обмотки якоря двигателей серии 4П
(пазы полузакрытые, обмоточный провод ПЭТ-155;
двигатели 4П с $h = 80 \div 160$ мм – рис. а;
двигатели 4ПФ с $h = 112 \div 200$ мм – рис. б)

Рисунок	Позиция	Материал	Число слоев	Одно- сторонняя толщина изоляции, мм
 а	1	Пленкосинтокартон	1	0,3
	2	ПСК-А-175 То же	1	0,3
 б	1	Пленкосинтокартон	1	0,35
	2	ПСК-ЛП-125	1	0,35
	3	То же "	1	0,35

с двумя и с большим числом витков выполняют, если это позволяет место, с двойными головками, что облегчает соединение выводов секций с пластинами коллектора и несколько уменьшает вылет лобовых частей катушек, а следовательно, и общую длину машины (рис. 3.47).

Обмотки из прямоугольного провода имеют гильзовую или непрерывную изоляцию (табл. 3.20–3.22). В машинах на напряжение свыше 600 В дополнительно изолируют промежуточные (средние, через одну) секции в пазовых и лобовых частях.

Обмотку якоря закрепляют в пазах с помощью клиньев или бандажами. Для крепления обмоток из круглого провода пользуются только

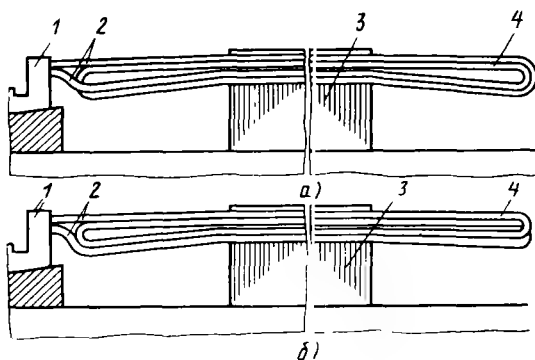


Рис. 3.47. Секции обмотки в пазах якоря:

а – с одинарной головкой; *б* – с двойной головкой; 1 – пластина коллектора; 2 – выводные концы секций; 3 – сердечник якоря; 4 – головка секций

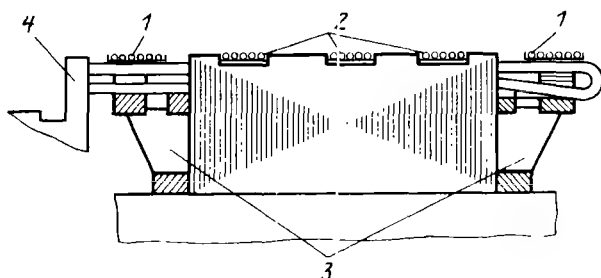


Рис. 3.48. Крепление обмотки якоря бандажами:

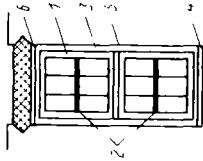
1 – бандажи на лобовых частях; 2 – бандажи на пазовой части; 3 – обмоткодержатели; 4 – коллекторная пластина

клиньями. Обмотку из прямоугольного провода в двигателях с высотой оси вращения не более 315 мм большей частью крепят в пазовой части бандажами из стальной немагнитной проволоки или из нетканой стеклотенты. Бандажи располагают в кольцевых бандажных канавках сердечника якоря (рис. 3.48), которые образуются при шихтовке сердечника листами магнитопровода с меньшим диаметром. По длине якоря располагают несколько канавок; длина каждой из них 15–20 мм, а общая длина всех канавок на якоре обычно не превышает приблизительно 1/3 конструктивной длины сердечника якоря.

В двигателях с $h > 315$ мм пазовые части обмоток крепят клиньями из стеклотекстолита.

Таблица 3.20. Изоляция обмотки машины постоянного тока (пазы открытые, обмотки из прямоугольного провода, $h = 225 \div 315$ мм, напряжение 600 В)

Часть обмотки	Позиция	Материал		Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм														
						по высоте при w_s														
		Наименование, марка		Толщина, мм		Класс нагревостойкости		Класс нагревостойкости		по ширине										
										ри-не										
Класс нагревостойкости		В		Ф и Н		В		Ф и Н		1		2		3		4				
В	Ф	Н	В	Ф	Н	В	Ф	Н	В	Ф	Н	В	Ф	Н	В	Ф	Н			
Пазовая	1	Слюдопласто- фольи ИФГ-Б	Синтоф- лий F	Синтоф- лий Н	0,15	0,16	4,5 обо- рота	3,5 обо- рота	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2			
	2	То же	То же	То же	0,15	0,16	1	0-6	-	-	0,3	0,6	0,6	0,6	0,9	0,9	0,9			
	3	Стеклопакоткань ЛСП			0,15				0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6			
	4	Стеклотекстолит																		
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5			
	6	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5			
Лобовая	Допуск на укладку обмотки																			
	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина или без высоты бандажной канавки)																			
	7	Стеклопленочная лента ЛС-ПЗ-934-ТП	Пленка полиамидная ПМ 0,5		0,15		1	1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6			
	8	Стеклопленочная лампа ЛЭС			0,1		1	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4			
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)															1	1	1	1





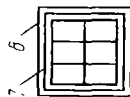
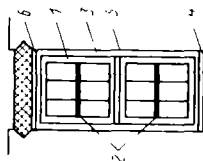
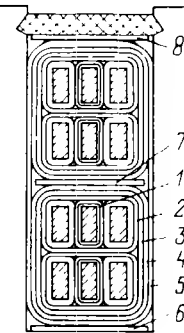
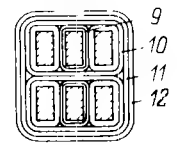


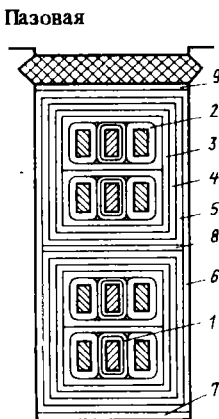
Таблица 3.21. Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока (пазы прямоугольные открытые; обмотка двухслойная петлевая, волновая, лягушачья разрезная из прямоугольного провода марки ПСД; $h = 350 \div 500$ мм; напряжение до 1000 В: класс нагревостойкости В)

Часть обмотки	Позиция	Материал		Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм				
		Наименование, марка	Толщина, мм		по ширине при числе u_{Π}				по высоте
					2	3	4	5	
	1	Стеклолента ЛЭС	0,1	1 впри-тык	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Лента стекло-слодопластовая ЛИ-СК-ТТ	0,1	1 впри-тык	0,28	0,28	0,28	0,28	1,12
	3	Стеклослодопластовая лента ЛИ-СКу-ТТ	0,14	1 впло-нахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	1,12
	4	Стеклолента ЛЭС	0,1	1 впри-тык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
	5	Стеклолако-ткань ЛСП-130/155	0,15	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	6	Разбухание изоляции от пропитки	—	—	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5
	6	Стеклотекстолит СТ	0,5	1	—	—	—	—	0,5
	7	То же	0,5	1	—	—	—	—	0,5
	8	"	0,5	1	—	—	—	—	0,5
		Допуск на укладку обмотки	—	—	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5
	Всего на паз (без витковой изоляции и клина)	—	—	—	2,14	2,14	2,44	2,54	6,24
	9	Стеклолента ЛЭС	0,1	1 впри-тык	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	10	Стеклослодопластовая лента ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 впри-тык	0,28	0,28	0,28	0,28	0,56
	11	Стеклослодопластовая лента ЛИ-СКу-ТТ	0,14	1 впло-нахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56

Часть обмотки	Позиция	Материал		Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм				
		Наименование, марка	Толщина, мм		по ширине при числе u п				по высоте
					2	3	4	5	
	12	Стекланная лента ЛЭС	0,1	1 впри- тык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Разбухание изоляции от пропитки	—	—	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)	—	—	1,54	1,54	1,64	1,74	2,02

Таблица 3.22. Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока (пазы при обмотке двухслойная петлевая, волновая, лягушачья разрезная из прямоуголь и ПСДК (класс нагревостойкости Н); $h = 355-500$ мм; напряжение до 1000 В)

Часть обмотки	Позиция	Материал	
		Наименование, марка	
		Класс нагревостойкости	
		Г	Н
Пазовая	1	Стекланная лента ЛЭС	Полиимидная пленка ПМ
	2	Фенилоновая бумага	
	3	Пленка полиимидная ПМ	
	4	Фенилоновая бумага	
	5	Стекланная лента ЛЭС	
	6	Фенилоновая бумага	
	7	Стеклотекстолит	
	8	СТЭФ	СТК
	9	СТЭФ	СТК
		СТЭФ	СТК
		Допуск на укладку обмотки	
		Всего на паз (без витковой изоляции и клина)	



Лобовые части всех обмоток якоря крепят бандажами из нетканой стеклоленты, а в машинах больших габаритов и с большой частотой вращения — из стальной немагнитной проволоки.

В последние годы для обмоток якорей все более широко применяют корпусную изоляцию типа "монолит", состоящую из стеклослюдинитовых или слюдопластовых материалов на эпоксидных связующих. Эта изоляция помимо высокой электрической и механической прочности обладает очень хорошей адгезией. В обмотках с такой изоляцией в ряде случаев можно не устанавливать пазовых клиньев.

Недостатком изоляции типа "монолит" является сложность ремонта обмотки, так как после запечки изоляции удалить обмотку из пазов крайне трудно.

моугольные открытые;
ного провода марки ПСД (класс нагревостойкости F)

				Двусторонняя толщина изоляции, мм				
Толщина, мм		Число слоев		по ширине при числе u_n				по вы- соте
Класс нагревостойкости				2	3	4	5	
Г	Н	Г	Н					
0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
	0,05	1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
	0,05	3 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	1,2
	0,05	1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	0,1	1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,8
	0,2	1		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	0,5	1						0,5
	0,5	1						0,5
	0,5	1						0,5
				0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
				2,1	2,1	2,3	2,3	5,8

Часть обмотки	Позиция	Материал	
		Наименование, марка	
		Класс нагревостойкости	
		Е	Н
Лобовая	10	Лента стеклянная ЛЭС	Полиамидная пленка ПМ
	11	Фенилоновая бумага	
	12	Пленка полиимидная ПМ	
	13	Фенилоновая бумага	
	14	Лента стеклянная ЛЭС	
	17	Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)	

3.14. ОСОБЕННОСТИ СХЕМ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Обмотки якоря подразделяют по направлению отгиба лобовых частей на волновые и петлевые и в зависимости от схем соединений на простые и сложные. Соотношения размеров и схемы обмоток характеризуются двумя частичными и результирующими шагами, шагом по коллектору и шагом по пазам якоря (рис. 3.49). Частичные шаги (первый — y_1 , второй — y_2) и результирующий шаг y измеряются в так называемых элементарных пазух, не имеющих эквивалента в линейных размерах. Под элементарным понимают условный паз, в котором как бы расположено по одной секционной стороне обмотки в каждом слое. Отсюда число элементарных пазов Z_3 , число секций во всей обмотке якоря S , число пластин коллектора K и число пазов якоря Z связаны следующим соотношением:

$$Z_3 = S = K = Zu_{\Pi},$$

где u_{Π} — число секций в катушке якоря.

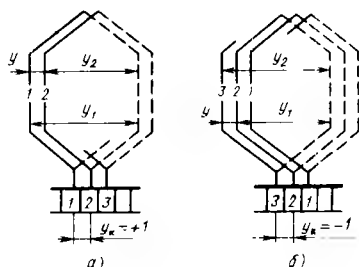


Рис. 3.49. Обозначение шагов петлевой обмотки якоря:

$$a \quad c y_K = +1; б \quad c y_K = -1$$

Число слоев				Двусторонняя толщина изоляции, мм				
Толщина, мм				по ширине при числе и п				по вы- соте
Класс нагревостойкости				2	3	4	5	
Ф	Н	Ф	Н					
0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
0,05		2 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
—		—		1,2	1,2	1,4	1,4	1,5

Шаг обмотки по коллектору u_k определяет расстояние между началом и концом секции по окружности коллектора в коллекторных делениях $t_k = (\pi D_k)/K$, где D_k — наружный диаметр коллектора.

Шаг обмотки по пазам (v_z) определяет расстояние между сторонами катушки или секции в зубцовых делениях якоря $t_z = (\pi D_a)/Z$, где D_a — наружный диаметр якоря.

Схемы обмоток якорей машин постоянного тока изображают на чертежах так же, как и машин переменного тока, т.е. в виде торцевых (вид со стороны коллектора) или развернутых схем. Наибольшее распространение получили развернутые схемы. Их изображение имеет ряд особенностей, связанных с тем, что каждая катушка обмотки якоря состоит из нескольких секций и имеет столько пар выводных концов, сколько секций содержится в ней. Выводные концы секций соединены с пластинами коллектора. Поэтому на схеме обмотки якоря нужно либо каждую секцию изображать отдельным многоугольником, либо показывать пазовые части катушки одной линией, а лобовые части каждой секции — отрезками, соединенными с концами пазовой части и с пластинами коллектора. Последний способ изображения встречается чаще.

На рис. 3.50 приведена развернутая схема простой петлевой обмотки, каждая катушка которой состоит из трех секций. Пазовые части катушек изображены в зависимости от их положения в пазу сплошными или пунктирными линиями, а в лобовых частях эти линии разветвляются: от каждой отходят три отрезка, обозначающих лобовые части трех секций, входящих в катушку. Начала и концы секций соединяют с пластинами коллектора. На схемах на коллекторных пластинах обычно показывают места расположения щеток.

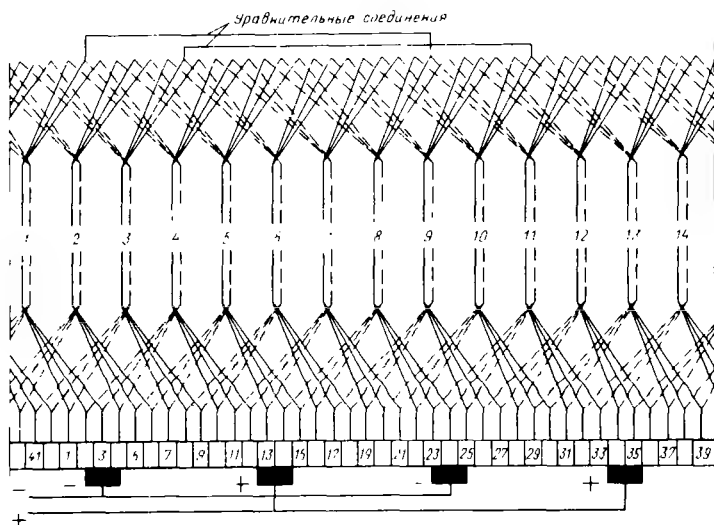


Рис. 3.50. Схема простой петлевой обмотки якоря. $Z = 14$, $u_{\Pi} = 3$, $K = 42$

Схемы обмоток якорей, как правило, состоят из ряда повторяющихся одинаковых элементов, поэтому полное представление об обмотке могут дать и сокращенные, так называемые практические схемы. В практических схемах вычерчивают секции только одной из катушек: показывают расположение обеих сторон секции в элементарных и действительных пазах и их соединение с пластинами коллектора. Пластины нумеруют так, чтобы их номера совпадали с номерами элементарных пазов, в которых располагают стороны секций, соединенных с данными пластинами. На рис. 3.51 показана практическая схема обмотки, развернутая схема которой приведена на рис. 3.50.

В большинстве обмоток первый частичный шаг секции y_1 выбирают кратным числу секций в слое пазов u_{Π} . В этом случае шаги по пазам катушек и всех секций обмотки одинаковые ($y_Z = y_1/u_{\Pi}$) и обмотку называют равносекционной (рис. 3.52,а). Если же y_1/u_{Π} не равно целому числу, то у секций будут разные шаги по пазам якоря (рис. 3.52,б). Такую обмотку нельзя выполнить из целых катушек. Она называется ступенчатой, выполняется только в стержневых обмотках и редко встречается в практике.

Для того чтобы легче понять особенности различных схем обмоток якоря, все последующие схемы в учебнике построены для обмоток с $u_{\Pi} = 1$, при этом $Z = Z_{\Sigma} = K$. Следует отметить, что обмотку якоря с $u_{\Pi} = 1$ выполняют крайне редко, так как в этом случае необоснованно

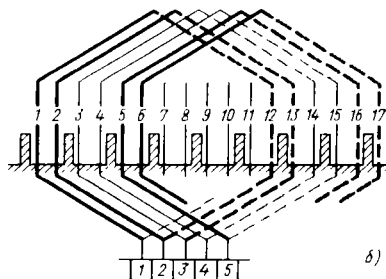
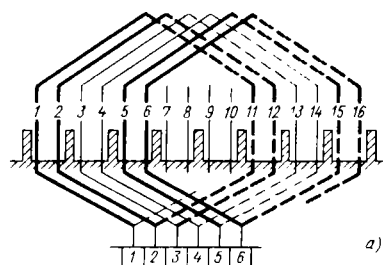
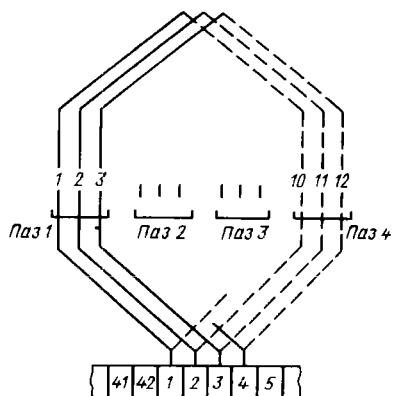


Рис. 3.51. Практическая схема петлевой обмотки, $y_Z = 3, u_{\Pi} = 3, y_1 = 9$

Рис. 3.52. Равносекционная и ступенчатая обмотки:

$a - y_1 = 10, u_{\Pi} = 2, y_1/u_{\Pi}$ — равно целому числу (обмотка равносекционная);
 $б - y_1 = 11, u_{\Pi} = 2, y_1/u_{\Pi}$ — не равно целому числу (обмотка ступенчатая)

увеличивается число пазов и ухудшается их заполнение проводниками, потому что толщина корпусной изоляции катушки, состоящей из одной или из нескольких секций, остается одинаковой [19].

3.15. ПРОСТЫЕ ПЕТЛЕВЫЕ ОБМОТКИ

В простых петлевых обмотках якоря (см. рис. 3.50) результирующий шаг равен шагу по коллектору:

$$y = y_K = y_1 - y_2 = \pm 1. \quad (3.26)$$

Большее распространение получили обмотки с $y = 1$, так как при $y = -1$ лобовые части секций несколько удлинняются и в них возникает дополнительное перекрещивание выводных концов (см. рис. 3.49,б). Первый частичный шаг петлевой обмотки выбирают близким к полюсному делению:

$$y_1 = Z_p/2p \pm \epsilon, \quad (3.27)$$

где ϵ — наименьшее число (или дробь), при котором y_1 выражен целым

числом, кратным числу u_n . Значение ϵ характеризует укорочение (удлинение) шага по сравнению с полюсным делением. Обмотки с укороченным шагом применяются чаще.

Рассмотрим более подробно особенности простых петлевых обмоток на примере схемы, приведенной на рис. 3.50.

На практической схеме этой обмотки (см. рис. 3.51) показано, что $y_1 = Z_p/2p \pm \epsilon = 42/4 - 1,5 = 9$; $y_2 = y_1 - y = 9 - 1 = 8$. Шаги по пазам всех секций одинаковы: $y_z = y_1/u_n = 9/3 = 3$. Обмотка равносекционная. Если же выполнить первый частичный шаг $y_1 = 42/4 - 0,5 = 10$ ($y_2 = 10 - 1 = 9$), то $y_1/u_n = 10/3$ становится не равным целому числу. Шаги секций по пазам будут разные (рис. 3.52) и обмотка получится ступенчатой.

При простой петлевой обмотке щетки на коллекторе должны быть расположены обязательно через каждое полюсное деление. Замыкая пластины коллектора, они образуют в обмотке $2p$ параллельных ветвей (рис. 3.53). Поэтому в простой петлевой обмотке число параллельных ветвей всегда равно числу полюсов машины: $2a = 2p$.

Параллельные ветви в петлевой обмотке содержат несколько последовательно соединенных между собой секций, в каждой из которых во время работы машины наводится ЭДС. При сборке машины из-за допусков при штамповке и шихтовке сердечника неравномерности воздушного зазора под разными полюсами и ряда других причин всегда существует некоторая асимметрия магнитной цепи. Поэтому ЭДС, наводимые в секциях в разных параллельных ветвях, немного отличаются друг от друга. Сопротивления параллельных ветвей практически всегда различаются между собой из-за различного качества паяк мест соединений секций и пластин коллектора. По этим причинам токи в параллельных ветвях петлевой обмотки якоря никогда не бывают абсолютно одинаковыми, так как в ветвях обмотки циркулируют уравнивающие токи. Они замыкаются через скользящие контакты между щетками и поверхностью коллектора и перегружают их, при этом коммутация машин ухудшается, появляется искрение под щетками, пластины подгорают и коллектор быстро выходит из строя.

Чтобы разгрузить щеточные контакты от уравнивающих токов, в якорях с петлевой обмоткой устанавливают уравнивающие соединения первого рода. Уравнивающие соединения — это изолированные провод-

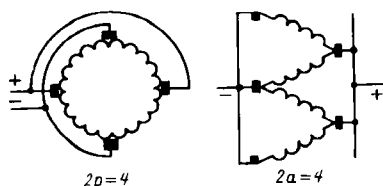


Рис. 3.53. Параллельные ветви простой петлевой обмотки

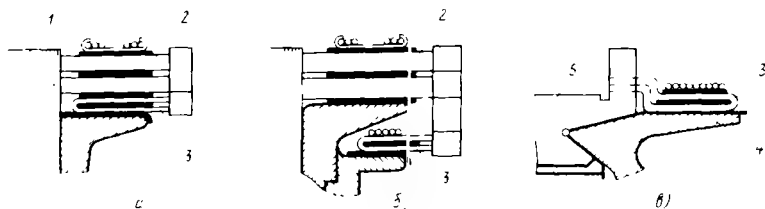


Рис. 3.54. Расположение уравнивательных соединений первого рода:

а, б – со стороны, противоположной коллектору; *в* – со стороны коллектора; *1* – сердечник якоря; *2* – лобовые части обмотки; *3* – уравнивательные соединения; *4* – задний нажимной конус коллектора; *5* – коллектор

ники, которые соединяют точки обмотки, имеющие теоретически одинаковые потенциалы. Уравнивательные соединения не уменьшают уравнивательные токи, а лишь направляют их по безвредному для работы машины пути, обеспечивая нормальную работу щеточного контакта без перегрузки, создаваемой уравнительными токами.

В простой петлевой обмотке одинаковые потенциалы должны быть у всех секций, расположенных на расстоянии двойного полюсного деления друг от друга. Поэтому шаг уравнивательных соединений $y_{ур} = K/p$. Наиболее удобные места для подсоединения уравнивателей к секциям – это коллекторные пластины или головки лобовых частей секций со стороны, противоположной коллектору (рис. 3.54).

На схеме рис. 3.50 условно показаны только два уравнивательных соединения, выполненных с шагом, равным $y_{ур} = K/p = 42/2 = 21$ элементарных пазов.

Уравнивательные соединения первого рода выполняют проводниками с площадью поперечного сечения, равной 20–30% сечения эффективного проводника обмотки. В машинах общего назначения чаще всего устанавливают по два-три уравнивательных соединения на каждую пару параллельных ветвей или по одному уравнивательному соединению на паз якоря, т.е. в 3–4 раза меньше, чем секций в обмотке.

При установке уравнивательных соединений (рис. 3.54) усложняется технологический процесс изготовления якоря и увеличивается расход меди, поэтому петлевые обмотки применяют лишь в машинах, в которых не могут быть выполнены простые волновые обмотки.

3.16. ПРОСТЫЕ ВОЛНОВЫЕ ОБМОТКИ

Схема простой волновой обмотки якоря приведена на рис. 3.55. Обозначения шагов обмотки показаны на рис. 3.56. Шаг простой волновой обмотки по коллектору равен результирующему шагу:

$$y_k = y = (K \mp 1)/p.$$

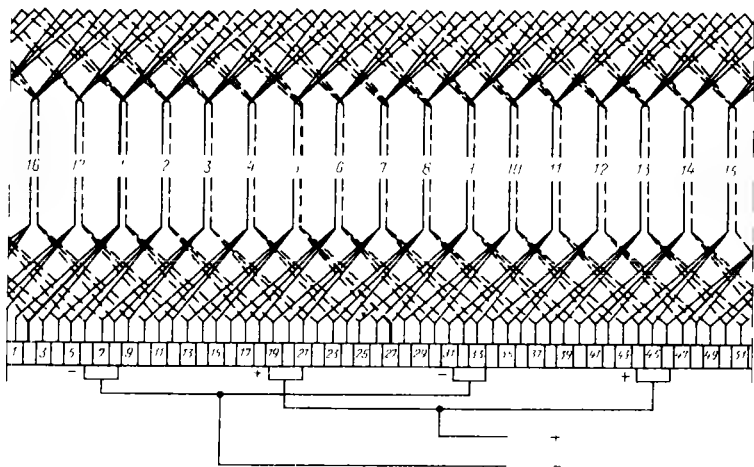


Рис. 3.55. Схема простой волновой обмотки якоря, $Z = 17$, $K = 51$, $2p = 4$

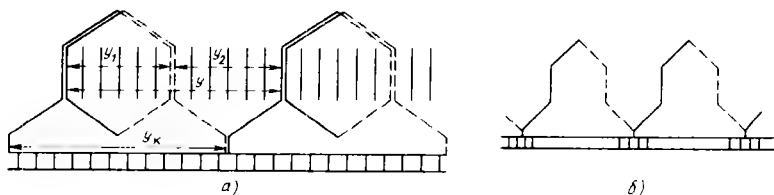


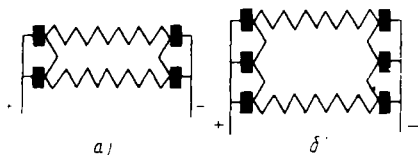
Рис. 3.56. Элемент схемы и обозначение шагов простой волновой обмотки:
 а с двухвитковыми секциями; б с одновитковыми секциями

В этой формуле знак — предпочтительный, так как при знаке + в обмотке появляются дополнительные перекрещивания выводных концов секций. Для первого частичного шага $y_1 = K/2p \pm \epsilon$ сохраняется следующее условие: y_1/u_{Π} равно целому числу, иначе обмотка будет ступенчатой. Второй частичный шаг $y_2 = y - y_1$.

Секции волновой обмотки соединяют друг с другом последовательно с результирующим шагом, близким к двойному полюсному делению. Поэтому при установке щеток на коллектор обмотка соединяется в две параллельные ветви независимо от числа полюсов машины. В простых волновых обмотках всегда $2a = 2$ (рис. 3.57). Особенностью обмоток является также возможность работы машины при неполном числе

Рис. 3.57 Параллельные ветви в простой волновой обмотке:

$$a - c2p = 4; \delta - c2p = 6$$



щеточных болтов. Действительно, как видно из рис. 3.57, уменьшение числа щеточных болтов не приводит к изменению направления токов в параллельных ветвях обмотки. Это обстоятельство используют, например, в ряде тяговых двигателей постоянного тока, в которых размещение полного числа щеточных болтов, равного $2p$, затруднено из-за недостатка места.

При $2a = 2$ в обмотке отсутствуют эквипотенциальные точки и установка уравнивательных соединений не требуется. Поэтому волновые обмотки более технологичны и дешевле по сравнению с петлевыми. Простые волновые обмотки применяют в большинстве машин, номинальный ток которых не превышает 500–600 А, т.е. ток в каждой параллельной ветви волновой обмотки остается меньшим 250–300 А.

Простые волновые обмотки могут быть выполнены симметричными только при условии, что $y_k = (K \mp 1)/p$ равно целому числу. Это накладывает определенные ограничения на соотношение чисел K и p . В частности, машины общего назначения мощностью до 200–300 кВт выпускают в большинстве случаев в четырехполюсном исполнении, т.е. с $p = 2$. Следовательно, для обеспечения симметрии обмотки коллектор якоря должен содержать нечетное число пластин. Но так как $K = Zu_n$, то нечетными должны быть также число пазов якоря Z и число секций в катушке u_n . В ряде случаев эти условия невыполнимы при заданных линейной нагрузке и уровнях магнитной индукции на участках магнитопровода. В таких якорях при $(K \mp 1)/p$, не равном целому числу, могут быть выполнены несимметричные волновые обмотки: обмотка с мертвой секцией или искусственно-замкнутая обмотка.

Обмотка с мертвой секцией применяется чаще. Для ее выполнения коллектор машины берут с числом пластин, на одну меньшим, чем число секций в обмотке якоря, т.е. с нечетным числом пластин: $K' = Zu_n - 1$. Тогда $y_k = (K' \mp 1)/p$ равно целому числу. По рассчитанному y_k находят частичные шаги y_1 и y_2 и строят волновую обмотку. Число секций в обмотке $S = Zu_n$, т.е. на одну больше, чем пластин коллектора. В пазы устанавливают все секции, но одну из них не соединяют с коллектором. Образуется "мертвая секция". Выводные концы этой секции подрезают и изолируют; лобовые части закрепляют бандажом вместе со всей обмоткой.

На рис. 3.58 в качестве примера приведена схема простой волновой обмотки $2p = 4$ с мертвой секцией, в которой для упрощения принято

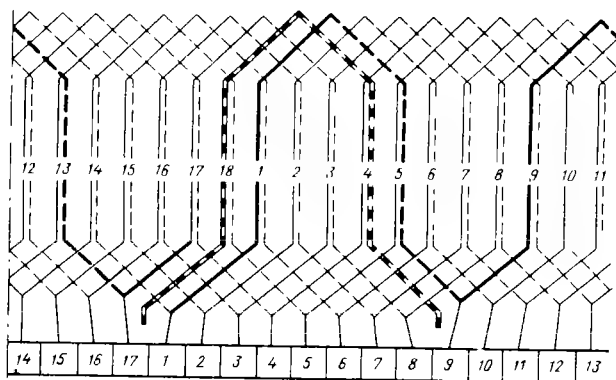


Рис. 3.58. Схема волновой обмотки с мертвой секцией, $Z = 18$, $u_{\Pi} = 1$, $K = 17$

$Z = 18$, $u_{\Pi} = 1$. Для построения схемы взято $K' = 18 - 1 = 17$; $y_K = (17 - 1)/2 = 8$; $y_1 = 4$. Мертвая секция, не соединенная с пластинами коллектора, выделена на схеме прерывистой жирной линией. Несимметрия схемы проявляется, например, в различных шагах y_2 : шаги по пазам 5–9, 6–10, 7–11 и т.д. не равны шагам 1–6, 2–7, 3–8 и т.д.

Обмотки с мертвой секцией встречаются в машинах, коллекторы которых имеют большое ($K > 100$) число коллекторных пластин, при этом возникающая несимметрия практически незаметна.

Мертвую секцию можно было бы вообще не укладывать в пазы якоря, однако это нарушает последовательность укладки обмотки и требует заполнения оставшихся свободными частей пазов изоляционным материалом и дополнительных мер при балансировке якоря.

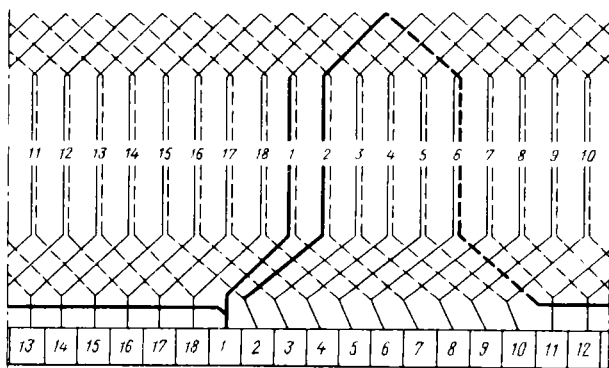


Рис. 3.59. Схема волновой искусственно-замкнутой обмотки, $Z = 18$, $u_{\Pi} = 1$, $K = 18$

Несимметричные искусственно-замкнутые обмотки могут быть выполнены с обычным соотношением Z , $u_{\text{ц}}$ и K . При $(K \mp 1)/p$, не равным целому числу, шаги обмотки рассчитывают по условным данным: $K' = K + 1$ и $Z' = Z + 1$. Тогда $y'_k = (K' \mp 1)/p$ равно целому числу. Обмотку выполняют с частичными шагами $y_1 + y_2 = y'_k = y'_k$. При построении обмотки (рис. 3.59) шаги отсчитывают от первой коллекторной пластины, причем в конце каждого обхода расчетный шаг уменьшают на единицу. После построения всей обмотки конец последней секции соединяют с первой пластиной коллектора, пропуская провод по лобовым частям. Обмотка применяется редко из-за неудобства закрепления провода, соединяющего конец последней секции с первой коллекторной пластиной [19, 23].

3.17. СЛОЖНЫЕ ОБМОТКИ ЯКОРЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В машинах с большими номинальными токами при петлевой обмотке якоря токи в каждой из параллельных ветвей могут превосходить допустимые, т.е. быть выше 250–300 А. Для увеличения числа параллельных ветвей обмотку якоря выполняют сложной петлевой. На рис. 3.60 показан элемент схемы одного из типов сложной обмотки — двухходовой петлевой. Она состоит как бы из двух самостоятельных простых петлевых обмоток (на рис. 3.60 показаны линиями разной толщины). Секции одной из них расположены в нечетных элементарных пазах якоря и соединены с нечетными пластинами коллектора. Секции другой расположены в четных элементарных пазах и соединены с четными пластинами коллектора. Шаг обмоток по коллектору $y_k = 2$. Ширина щеток должна быть такой, чтобы они одновременно замыкали секции обеих обмоток. В каждой из отдельных простых обмоток $2a = 2p$. При установке щеток на коллектор обе обмотки соединяют параллельно и общее число параллельных ветвей обмотки удваивается. В общем случае, если сложная обмотка состоит из m простых, шаг по коллектору каждой из них будет равен $y_k = m$, а общее число параллельных ветвей после установки щеток $2a = 2pm$, где m — число ходов, т.е. число простых обмоток, составляющих сложную.

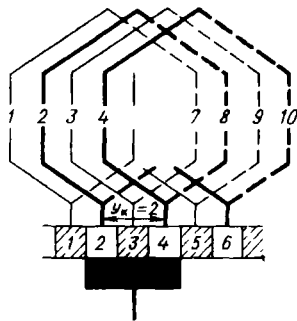


Рис. 3.60. Элемент сложной двухходовой петлевой обмотки

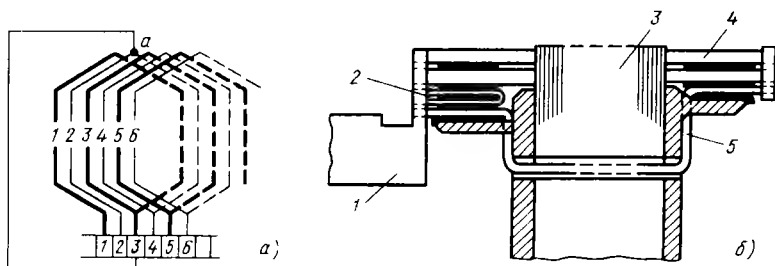


Рис. 3.61. Уравнительные соединения второго рода в двухходовых петлевых обмотках:

а — соединение точек теоретически равного потенциала на схеме обмотки; *б* — расположение уравнительных соединений второго рода на якоре машины; 1 — коллектор; 2 — уравнительные соединения 1-го рода; 3 — сердечник якоря; 4 — обмотка якоря; 5 — уравнительные соединения 2-го рода

Если в сложной петлевой обмотке K/m — целое число, то составляющие ее простые обмотки до установки щеток на коллектор электрически не соединены между собой. Каждая из них замыкается сама на себя после обхода по пазам якоря. Такие сложные обмотки называют m -кратнозамкнутыми. При K/m , не равном целому числу, обмотка замыкается только 1 раз после последовательных m обходов всех пазов якоря. Такие обмотки называют однократнозамкнутыми.

В сложных петлевых обмотках точки с теоретически равным потенциалом располагаются не только в пределах каждого хода обмотки (в пределах каждой из простых обмоток), но и на разных ходах. Так, например, на элементе схемы двухходовой петлевой обмотки (рис. 3.61*а*) одинаковый потенциал должен быть у точки, обозначенной на схеме буквой *а*, принадлежащей одной из простых обмоток, и у вывода секции второй простой обмотки, расположенной в пазу 3, соединенном с пластиной 3. Это объясняется равенством напряжений между пластинами: $U_{к23} = U_{к34}$.

Соединения точек равного потенциала, расположенных на разных ходах (разных простых обмотках, образующих сложную), называют уравнительными соединениями второго рода.

В двукратнозамкнутых двухходовых петлевых обмотках при K/p , равном целому числу, точки теоретически равного потенциала располагаются с разных сторон якоря. В таких машинах уравнительные соединения второго рода необходимо пропускать под магнитопроводом якоря вдоль вала или через втулку (рис. 3.61*б*).

При K/p , равном нечетному числу, в двухходовых двукратнозамкнутых петлевых обмотках уравнительные соединения располагаются только с одной стороны якоря (рис. 3.62). На приведенном рисунке

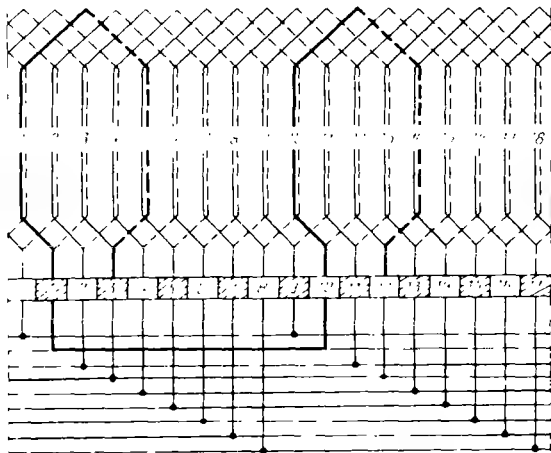


Рис. 3.62. Уравнивательные соединения в сложной двухходовой петлевой обмотке якоря при K/p , равном нечетному числу

две секции, соединенные уравнивательными соединениями, выделены жирными линиями.

В машинах специальных исполнений находят применение также и сложные волновые обмотки с $y_k = (K \mp m)/p$. В них число параллельных ветвей увеличивается в m раз по сравнению с простыми обмотками, т.е. $2a = 2m$.

В сложных волновых обмотках, как и в сложных петлевых, необходима установка уравнивательных соединений второго рода.

В ряде машин средней мощности для снижения токов в параллельных ветвях и с целью избежать необходимости установки уравнивательных соединений применяют комбинированную, так называемую лягушачью обмотку.

Катушка лягушачьей обмотки состоит из секций петлевой и волновой обмоток, соединенных с пластинами одного коллектора. Таким образом, в пазах якоря размещаются как бы две самостоятельные обмотки — волновая и петлевая, соединенные через коллектор параллельно. Числа параллельных ветвей в обеих обмотках должны быть одинаковыми, поэтому волновая обмотка выполняется сложной. Обычно за базу при построении лягушачьей обмотки принимают простую петлевую обмотку, а волновую обмотку выполняют сложной с числом ходов $m_b = p$. В этом случае число параллельных ветвей волновой обмотки становится равным числу параллельных ветвей простой петлевой, т.е. $2a_b = 2a_n = 2p$. Общее число параллельных ветвей лягушачьей обмотки становится в 2 раза больше, чем в петлевой. Достоинством обмотки

является отсутствие необходимости установки уравнивательных соединений. Это объясняется тем, что секции волновой обмотки выполняют роль уравнивательных соединений первого рода для петлевой обмотки, а секции петлевой обмотки — роль уравнивательных соединений второго рода для сложной волновой [23, 28].

3.18. ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И КОМПЕНСАЦИОННЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Конструкция обмоток возбуждения машин постоянного тока определяется мощностью машины, схемой ее возбуждения и назначением обмоток: обмотки главных полюсов машин параллельного и последовательного возбуждения и обмотки дополнительных полюсов.

Обмотки параллельного возбуждения в большинстве машин наматывают из круглого обмоточного провода. Как правило, они имеют много витков (рис. 3.63). В крупных машинах постоянного тока их наматывают из прямоугольного изолированного провода обычно в несколько рядов.

Для обмоток последовательного возбуждения и дополнительных полюсов круглый обмоточный провод используют лишь в машинах малой мощности с номинальным током, не превышающим 10–15 А. В машинах с большим номинальным током катушки наматывают из изолирован-

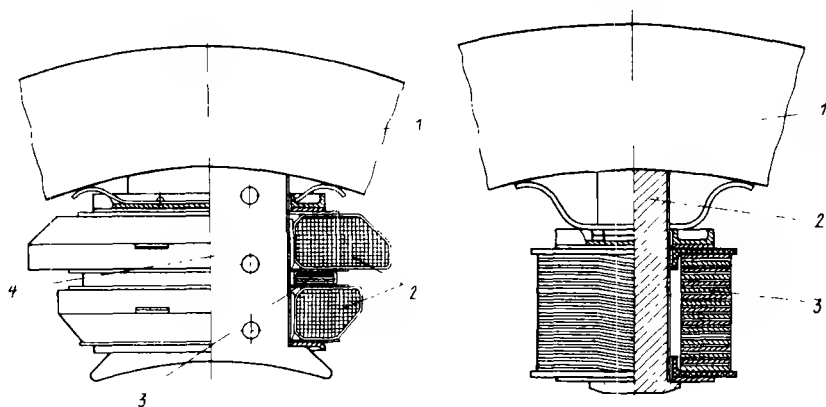


Рис. 3.63. Главный полюс машины постоянного тока с обмотками возбуждения:
1 — станина; 2 — обмотка параллельного возбуждения; 3 — обмотка последовательного возбуждения (стабилизирующая); 4 — сердечник полюса

Рис. 3.64. Добавочный полюс машины постоянного тока с обмоткой:
1 — станина; 2 — сердечник полюса; 3 — обмотка добавочного полюса

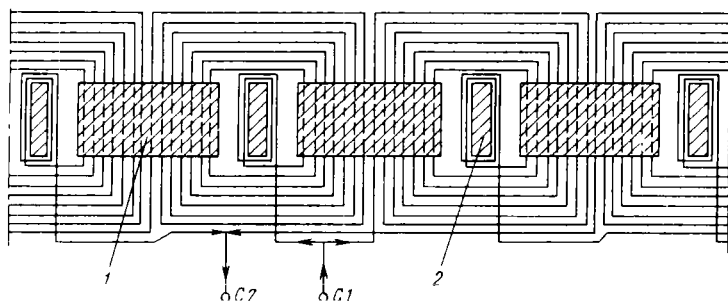


Рис. 3.65. Схема включения компенсационной обмотки машин постоянного тока:
1 — главный полюс; 2 — дополнительный полюс

ного прямоугольного обмоточного провода, а в машинах большей мощности — из неизолированной шинной меди (рис. 3.64).

В машинах смешанного возбуждения или параллельного со стабилизирующей обмоткой катушки параллельного и последовательного возбуждения устанавливают на главных полюсах друг над другом или делят многовитковую катушку параллельного возбуждения на две части (см. рис. 3.63). Между ними часто располагают катушку последовательного возбуждения (стабилизирующую).

Компенсационные обмотки в машинах постоянного тока устанавливают для компенсации действия реакции якоря по продольной оси. Обмотка обычно устанавливается только в машинах большой мощности и выполняется из прямоугольного провода. Катушки укладываются в пазы полюсных наконечников так, что одна сторона катушки располагается в пазах наконечника одного полюса, другая — в пазах наконечника другого. Компенсационная обмотка, в большинстве машин однослойная, выполнена из концентрических катушек и соединена последовательно с обмоткой дополнительных полюсов (рис. 3.65).

В последние годы появилась тенденция устанавливать компенсационную обмотку и в машинах средней мощности. Это позволяет уменьшить воздушный зазор машины, что приводит к возможности уменьшения ее габаритов из-за снижения требуемой МДС обмотки возбуждения.

3.19. ОБОЗНАЧЕНИЕ ВЫВОДОВ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГОСТ 26772-85 устанавливает две различные системы обозначений выводов обмоток машин постоянного тока: для машин, разработанных после введения этого ГОСТ (1.01.1987 г.), и для ранее разработанных и модернизируемых машин. Для ранее разработанных и модернизируемых машин постоянного тока сохраняется система обозначений, установ-

Таблица 3.23. Обозначения выводов обмоток машин постоянного тока выпуска до 1987 г. и модернизируемых (по ГОСТ 183-74)

Наименование обмотки	Обозначение выводов	
	Начало	Конец
Обмотка якоря	Я1	Я2
Компенсационная	К1	К2
Обмотка добавочных полюсов	Д1	Д2
Последовательная возбуждения	С1	С2
Независимая возбуждения	Н1	Н2
Параллельная возбуждения	Ш1	Ш2
Пусковая	П1	П2
Уравнительный провод и уравни- тельная обмотка	У1	У2
Обмотка особого назначения	О1, О3	О2, О4

ленная ГОСТ 183-74 (табл. 3.23), состоящая из букв русского алфавита и цифр.

Обозначение начала (цифра 1) и конца (цифра 2) каждой из обмоток должно соответствовать протеканию тока в направлении от начала к концу обмотки при правом вращении машины в двигательном режиме во всех обмотках, кроме размагничивающей на главных полюсах. Если в машине имеется несколько обмоток одного наименования, то их начала и концы после буквенных обозначений (Ш, Н и т.п.) должны иметь цифровые обозначения, стоящие после соответствующих букв, например Ш3-Ш4, Н3-Н4, С5-С6.

Для вновь разрабатываемых машин установлены обозначения выводов, состоящие из букв латинского алфавита и цифр (табл. 3.24) и соответствующие СТ СЭВ 3170-81 и публикации МЭК 34-8 1977 г. В этой системе цифры, стоящие после букв в обозначении нескольких обмоток возбуждения, работающих по одной и той же оси, проставляют в такой последовательности, чтобы при протекании тока от зажимов с меньшим номером к зажимам с большим номером магнитные поля этих обмоток совпадали по направлению. В машинах со взаимосвязанными обмотками добавочных полюсов и компенсационной для обозначения вывода применяется буква С.

Обозначения наносят непосредственно на концы обмоток (на кабельные наконечники, шинные зажимы или специальные обжимы, закрепленные на проводах) или на клеммную колодку коробки выводов рядом с выводом обмотки. Навеска на выводные концы обмотки бирок с обозначениями не допускается.

Для обозначения выводов обмоток машин постоянного тока малой мощности, как ранее разработанных, так и вновь разрабатываемых, при

Таблица 3.24. Обозначения выводов обмоток машин постоянного тока, разработанных после 1.01.1987 г. (по ГОСТ 26772-85)

Наименование обмотки	Обозначение выводов	
	Начало	Конец
Обмотка якоря	<i>A1</i>	<i>A2</i>
Обмотка добавочного полюса	<i>B2</i>	<i>B2</i>
Двухсекционная добавочного полюса (присоединенная к якорю с обеих сторон) с четырьмя выводами	<i>1B1</i> <i>2B1</i>	<i>1B2</i> <i>2B2</i>
Компенсационная	<i>C1</i>	<i>C2</i>
Компенсационная, двухсекционная (присоединенная к якорю с обеих сторон) с четырьмя выводами	<i>1C1</i> <i>2C1</i>	<i>1C2</i> <i>2C2</i>
Последовательного возбуждения	<i>D1</i>	<i>D2</i>
Параллельного возбуждения	<i>E1</i>	<i>E2</i>
Независимого возбуждения	<i>F1</i>	<i>F2</i>
Независимого возбуждения с четырьмя выводами для последовательного и параллельного включения	<i>F1</i> <i>F5</i>	<i>F2</i> <i>F6</i>
Вспомогательная по продольной оси	<i>H1</i>	<i>H2</i>
Вспомогательная по поперечной оси	<i>J1</i>	<i>J2</i>

диаметре корпуса не более 40 мм и при отсутствии места для буквенно-цифровых обозначений допускается цветовое обозначение проводами с разноцветной изоляцией, краской и т.п.

В ряде машин постоянного тока некоторые обмотки соединяют внутри машины и их соединения не выводят наружу, например конец обмотки якоря и начало обмотки дополнительных полюсов. Соединенные таким образом начала и концы обмоток не обозначают.

Контрольные вопросы

1. Сопоставьте применяемые типы обмоток с мощностью и номинальным напряжением машин переменного тока.
2. Какие основные требования предъявляют к изоляции обмоток?
3. Почему коэффициент укорочения однослойных обмоток равен единице?
4. В каких случаях и зачем выполняют обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу?
5. В каких обмотках можно выполнять большее число параллельных ветвей: в однослойных, в двухслойных, в обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу?
6. Какие обмотки выполняют в статорах многоскоростных асинхронных двигателей?
7. В чем отличие сложных обмоток якорей машин постоянного тока от простых?
8. В каких случаях выполняют волновую обмотку якоря машины постоянного тока с мертвой секцией?

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

4.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Электромагнитное поле электрической машины образуется МДС обмоток статора и ротора, расположенных в пазах магнитопроводов или на сердечниках явно выраженных полюсов. Неравномерность распределения проводников обмотки по объему машины, нелинейность магнитной характеристики и сложность конфигурации магнитопроводов, а также наличие воздушного промежутка между статором и ротором делают точный расчет поля в машине практически невозможным даже при применении современных вычислительных средств. Поэтому при проектировании машины пользуются рядом упрощающих допущений.

Поле в машине подразделяют на главное поле и поле рассеяния. Под главным понимают поле, магнитные линии которого сцеплены с витками как первичной, так и вторичной обмотки. Полем рассеяния называют поле, линии которого сцеплены с витками какой-либо одной из обмоток — статора или ротора (соответственно поле рассеяния статора и поле рассеяния ротора).

Магнитные линии главного поля замыкаются по магнитопроводам статора и ротора и пересекают воздушный зазор. Элементы магнитопроводов и зазоры, по которым проходит главный поток каждой пары полюсов, называют магнитной цепью машины. Расчет магнитной цепи заключается в определении суммарного магнитного напряжения всех ее участков, соответствующего определенному значению потока [14].

В идеальной симметричной машине потоки каждой пары полюсов одинаковы, поэтому при расчете пренебрегают возможной асимметрией потоков реальных машин и рассчитывают магнитную цепь только одной пары полюсов. На поперечном сечении магнитопроводов магнитные линии потока пары полюсов располагаются на секторе, составляющем $\frac{1}{2}p$ часть всего сечения.

На рис. 4.1, *а* представлен сектор поперечного сечения машины с распределенными обмотками на статоре и роторе, а на рис. 4.1, *б* — с явно выраженными полюсами на роторе. На этих рисунках пунктиром показана средняя линия потока пары полюсов.

В целях упрощения расчета магнитная цепь машины подразделяется на ряд последовательно расположенных вдоль силовой линии участков, каждый из которых имеет сравнительно простую конфигурацию и состоит из материала с определенной магнитной характеристикой. Предполагается также, что на участках известно основное направление магнитных линий потока. Для машин с распределенными обмотками на статоре и роторе, например асинхронных, такими участками являются

Рис. 4.1. Магнитная цепь электрической машины:

a — с распределенными обмотками;
б — с явно выраженными полюсами

(рис. 4.1, *a*) ядро статора (участок 1–2), зубцовые зоны статора (участки 2–3 и 1–8) и ротора (4–5 и 6–7), воздушный зазор (3–4 и 7–8) и ядро ротора (5–6), для машин с явно выраженными полюсами, например синхронных, (рис. 4.1, *б*) — ядро статора (участок 1–2), зубцовая зона статора (2–3 и 1–12), воздушный зазор (3–4, 11–12), сердечники полюсов (4–6 и 9–11), ядро ротора (7–8). При наличии демпферной обмотки отдельно учитывают участки, соответствующие ее зубцовой зоне (4–5 и 10–11). При наличии технологических воздушных промежутков в месте соединения полюсов с остовом ротора добавляются участки, соответствующие этим воздушным зазорам (6–7 и 8–9).

Для расчета магнитной цепи используется уравнение полного тока для замкнутой цепи

$$F_{\text{ц}} = \oint H dl \quad (4.1)$$

Интеграл берется по контуру вдоль линии потока. Правая часть равенства в соответствии с подразделением на участки представляется в виде суммы

$$F_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^n H_i l_i,$$

где n — число участков, на которые подразделена магнитная цепь; l_i — длина средней магнитной линии в пределах каждого из участков; H_i — расчетное значение напряженности магнитного поля на i -м участке.

Магнитное напряжение на каждом из участков цепи определяют приблизительно, принимая напряженность поля в пределах границ участка неизменной и равной расчетному для данного участка ее значению H_i . Тогда суммарная МДС магнитной цепи

$$F_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^n H_i l_i = \sum_{i=1}^n F_i. \quad (4.2)$$

Методы расчета магнитных напряжений различных участков цепи имеют особенности, обусловленные размерными соотношениями, характером распределения потока, необходимостью учета влияния потока рассеяния и другими факторами [12].

Ниже приводятся общие для всех рассматриваемых типов машин методы расчета характерных участков магнитной цепи.

4.2. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

В воздушном зазоре электрической машины индукция непостоянна. При распределенной обмотке она изменяется по кривой, близкой к синусоиде (рис. 4.2, а), а при сосредоточенных обмотках имеет форму, приближающуюся к прямоугольнику (рис. 4.2, б). Значение потока на полюсном делении

$$\Phi = l_{\delta} \int_0^{\tau} B_{\delta x} dx, \quad (4.3)$$

где l_{δ} — расчетная длина магнитопровода; $B_{\delta x}$ — индукция в зазоре в точке x .

В практических расчетах электрических машин производить интегрирование неудобно, тем более что точное аналитическое выражение распределения индукции вдоль дуги полюсного деления получить трудно. Поэтому вводится понятие расчетной полюсной дуги b_{δ} , на протяжении которой индукция принимается постоянной. Значение b_{δ} находится из условия равенства потоков в воздушном зазоре на единицу длины магнитопровода:

$$B_{\delta} b_{\delta} = \int_0^{\tau} B_{\delta x} dx, \quad (4.4)$$

где B_{δ} — максимальное значение индукции в воздушном зазоре.

Величина b_{δ} определяется как часть полюсного деления машины:

$$b_{\delta} = a_{\delta} \tau, \quad (4.5)$$

где a_{δ} — коэффициент полюсного перекрытия; его значение, как следует из определения b_{δ} , зависит от формы кривой поля в воздушном зазоре.

При синусоидальном распределении индукции по длине полюсного деления неявнополюсных машин

$$a_{\delta} = 2/\pi \approx 0,64. \quad (4.6)$$

При насыщении зубцов кривая поля уплощается и значение a_{δ} воз-

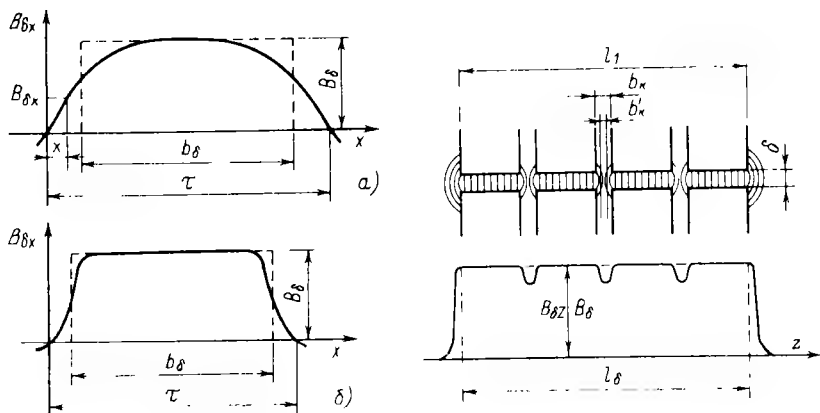


Рис. 4.2. Распределение индукции в воздушном зазоре на полюсном делении электрической машины:

a — с распределенной обмоткой; *б* — с сосредоточенной обмоткой (с явно выраженными полюсами)

Рис. 4.3. Распределение индукции в воздушном зазоре электрической машины по длине магнитопровода

растает. Для средненасыщенных машин значение α_δ лежит в пределах 0,7–0,74, но при больших насыщениях может превышать 0,8.

В машинах с явно выраженными полюсами форма кривой поля зависит от конфигурации, размеров и вида полюсных наконечников, поэтому расчетная длина полюсной дуги b_δ определяется в зависимости от размерных соотношений полюсных наконечников и зазора. Методы расчета b_δ для машин с явно выраженными полюсами приведены в главах книги, в которых рассматривается проектирование машин этих типов.

Картина поля в воздушном зазоре в осевой плоскости (рис. 4.3) показывает, что индукция по длине зазора также неодинакова. Против вентиляционных каналов она будет несколько меньше, чем на участках, лежащих против пакетов сердечника. Кроме того, часть магнитных линий потока замыкается через торцевые поверхности сердечника. Так как в расчетах используется постоянное значение B_δ , то для правильного определения потока через зазор вводится понятие расчетной длины магнитопровода l_δ , при определении которой учитывается неравномерность распределения B_δ вдоль зазора. Расчетная длина может быть найдена аналитическим решением, графическим построением по картине поля или аналогично определению b_δ , т.е. из условия

$$B_\delta l_\delta = \int_{-\infty}^{+\infty} B_{\delta z} dz, \quad (4.7)$$

определяющего равенство площадей прямоугольника длиной l_δ и высотой B_δ и площади криволинейной фигуры, ограниченной действительной кривой распределения индукции вдоль зазора (рис. 4.3).

Исследования показали, что доля потока полюсного деления, линии которого замыкаются через торцевые поверхности сердечника, зависит в основном от воздушного зазора. В машинах, имеющих малый зазор, например в асинхронных двигателях, эта часть потока незначительна, и в расчетах ее не учитывают. В машинах с большими зазорами увеличение расчетной длины воздушного зазора по сравнению с действительной за счет этой части потока принимается равным 2δ .

Влияние провалов в кривой индукции, возникающих над радиальными вентиляционными каналами, учитывается при определении l_δ следующим образом. Действительная ширина радиальных каналов b_k заменяется расчетной b'_k , которая зависит от соотношения b_k/δ .

Таким образом, расчетная длина магнитопровода в общем случае определяется по формуле

$$l_\delta = l_1 - n_k b'_k + 2\delta, \quad (4.8)$$

где l_1 — конструктивная длина магнитопровода; n_k и b'_k — соответственно число и расчетная ширина радиальных вентиляционных каналов.

При наличии каналов только на статоре (или только на роторе)

$$b'_k = \frac{(b_k/\delta)^2}{5 + b_k/\delta}. \quad (4.9)$$

При каналах и на статоре, и на роторе

$$b'_k = \frac{(b_k/\delta)^2}{2,5 + b_k/\delta}. \quad (4.10)$$

Радиальные вентиляционные каналы обычно выполняют шириной $b_k = 10$ мм. В машинах с малым воздушным зазором ($\delta \ll b_k$) расчетная ширина канала $b'_k \approx b_k$.

В машинах с большим воздушным зазором ($\delta \gg b_k$) расчетная ширина канала $b'_k \approx 0$.

С учетом рассмотренных особенностей распределения индукции в воздушном зазоре электрической машины расчетная площадь полюсного деления

$$Q_\delta = \alpha_\delta \tau l_\delta. \quad (4.11)$$

Тогда индукция в зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi}{Q_\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta} \quad (4.12)$$

Магнитодвижущая сила воздушного зазора между гладкими поверхностями

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} B_{\delta} \delta. \quad (4.13)$$

В большинстве машин поверхности статора и ротора, ограничивающие воздушный зазор, не гладкие, а имеют различные неровности: пазы, углубления для размещения бандажей и др. Магнитное сопротивление участков такого зазора в поперечном сечении машины различно, поэтому распределение индукции по площади воздушного зазора неравномерно. Наибольшая неравномерность возникает из-за наличия зубцов на статоре и роторе. Над коронками зубцов магнитные линии потока сгущаются, а над прорезями пазов плотность линии уменьшается (рис. 4.4). В кривой индукции в воздушном зазоре появляются провалы. Магнитное сопротивление и магнитное напряжение воздушного зазора при неравномерной индукции возрастают.

Увеличение магнитного напряжения учитывается введением коэффициента воздушного зазора (коэффициента Картера) k_{δ} . Этот коэффициент, полученный расчетом полей в зазорах с различным соотношением ширины зубцов и пазов, показывает, насколько возрастает магнитное напряжение зазора при зубчатой поверхности статора или ротора по сравнению с магнитным напряжением зазора между гладкими поверхностями.

Можно использовать также понятие расчетного воздушного зазора

$$\delta' = \delta k_{\delta},$$

т.е. равномерного воздушного зазора, который имеет магнитную проводимость, равную магнитной проводимости реального воздушного зазора. С учетом k_{δ} МДС зазора

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} B_{\delta} \delta k_{\delta}. \quad (4.14)$$

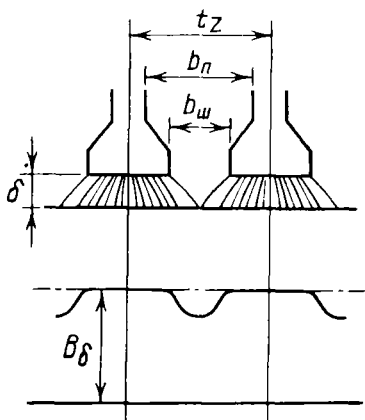


Рис. 4.4. К расчету коэффициента воздушного зазора

Если одна поверхность зазора гладкая, а другая зубчатая, то k_δ достаточно точно определяется по формуле

$$k_\delta = t_Z / (t_Z - \gamma\delta), \quad (4.15)$$

где

$$\gamma = \frac{(b_{ш}/\delta)^2}{5 + b_{ш}/\delta},$$

либо по формуле

$$k_\delta = \frac{t_Z + 10\delta}{t_Z - b_{ш} + 10\delta}. \quad (4.16)$$

Обозначения величин, входящих в формулы, ясны из рис. 4.4.

Формула (4.15) получила наибольшее распространение. Формула (4.16) используется, в основном, при открытых пазах.

Коэффициенты воздушного зазора рассчитывают отдельно для статора и для ротора. В первом случае предполагается, что поверхность статора зубчатая, а ротора — гладкая, во втором — наоборот: поверхность ротора зубчатая, а статора гладкая.

В расчетные формулы (4.14) — (4.16) подставляются значения t_Z и $b_{ш}$, характеризующие зубцы, влияние которых учитывается коэффициентами $k_{\delta 1}$ и $k_{\delta 2}$. Так, для машины, имеющей зубцы и на статоре, и на роторе, рассчитывают:

для статора

$$\gamma_1 = \frac{(b_{ш1}/\delta)^2}{5 + b_{ш1}/\delta}; \quad k_{\delta 1} = \frac{t_{Z1}}{t_{Z1} - \gamma_1\delta}, \quad (4.17)$$

для ротора

$$\gamma_2 = \frac{(b_{ш2}/\delta)^2}{5 + b_{ш2}/\delta}; \quad k_{\delta 2} = \frac{t_{Z2}}{t_{Z2} - \gamma_2\delta}, \quad (4.18)$$

где t_{Z1} , $b_{ш1}$ и t_{Z2} , $b_{ш2}$ — соответственно зубцовые деления и ширины шлица пазов статора и ротора.

По аналогичным формулам находят и другие частичные коэффициенты воздушного зазора $k_{\delta 3}$, $k_{\delta 4}$, ..., учитывающие влияние других неравномерностей воздушного зазора, например канавок для размещения бандажей на якорях машин постоянного тока.

Резльтирующий коэффициент воздушного зазора равен произведению всех частичных коэффициентов, рассчитанных для статора и ротора:

$$k_{\delta} = k_{\delta_1} k_{\delta_2} k_{\delta_3} \dots \quad (4.19)$$

Таким образом, МДС воздушного зазора электрической машины F_{δ} , А, определяется по формуле

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} B_{\delta} \delta k_{\delta}, \quad (4.20)$$

где k_{δ} — коэффициент воздушного зазора; B_{δ} — индукция в воздушном зазоре, Тл:

$$B_{\delta} = \Phi / (a_{\delta} \tau l_{\delta});$$

a_{δ} — коэффициент полюсного перекрытия; l_{δ} — расчетная длина магнитопровода.

4.3. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ЗУБЦОВЫХ ЗОН

При расчете магнитных напряжений зубцовых зон принимается допущение, что линии равного магнитного потенциала в поперечном сечении машины представляют собой окружности с центром на оси вращения ротора. При этом допущении магнитное напряжение зубцовой зоны статора F_{Z1} или ротора F_{Z2} определяется разностью магнитных потенциалов между эквипотенциальными поверхностями (на поперечном сечении окружностями), проходящими по дну пазов и по поверхности головок зубцов [14].

Обычно рассматривают поле в одном элементе зубцовой зоны — зубцовом (пазовом) делении $t_Z = \pi D/Z$. Магнитные сопротивления паза и зубца в магнитной цепи машины соединены параллельно, поэтому поток в зубцовом делении распределяется между ними пропорционально проводимостям магнитных силовых трубок, проходящих через зубец и паз. Пазы в электрической машине заполнены проводниками и их изоляцией, т.е. средой с магнитной проницаемостью, во много раз меньшей, чем проницаемость стали зубца. Поэтому поток в пазу составляет лишь небольшую часть общего потока зубцового деления. Эта часть потока как бы "вытесняется" из зубца в паз. При малом насыщении зубцов она очень мала, и в расчетах ее не учитывают. При увеличении насыщения зубцов доля потока в пазу возрастает и ее влияние начинает сказываться на магнитное напряжение зубцовой зоны F_Z .

Рассмотрим вначале расчет магнитного напряжения зубцовой зоны без учета вытеснения части потока в паз. При принятом допущении о конфигурации эквипотенциальных линий и в силу симметрии зубцовой зоны магнитные силовые линии, проходящие через середины оснований зубцов, совпадают с отрезками радиусов (см. рис. 4.1, а и б), поэтому

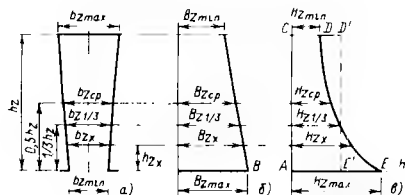


Рис. 4.5. К расчету магнитного напряжения зубцовой зоны

$$F_Z = \int_0^{h_Z} H_{Zx} dx,$$

где H_{Zx} — напряженность магнитного поля в сечении зубца, соответствующем расстоянию h_{Zx} от его узкой части; h_Z — высота зубца (рис. 4.5, а).

При постоянном сечении зубца считают, что напряженность поля в нем H_Z постоянна, тогда

$$F_Z = H_Z h_Z. \quad (4.21)$$

При переменном сечении зубца F_Z можно определить, разделив зубец по высоте на n достаточно малых участков с высотой Δh , в пределах которых изменением H_Z пренебрегают. Определив для каждого участка индукцию, напряженность магнитного поля, магнитное напряжение и просуммировав последние, находят магнитное напряжение зубца.

Поток, приходящийся на одно зубцовое деление,

$$\Phi_{tZ} = B_{\delta} t_Z l_{\delta}. \quad (4.22)$$

Если через b_{Zx} обозначить ширину зубца на высоте h_{Zx} , то соответствующее активное сечение зубца

$$S_{Zx} = k_c l_{ст} b_{Zx},$$

где k_c — коэффициент заполнения сердечника сталью; $l_{ст}$ — длина магнитопровода без вентиляционных каналов.

Индукция в рассматриваемом сечении зубца (рис. 4.5, б)

$$B_{Zx} = \frac{\Phi_{tZ}}{S_{Zx}} = \frac{B_{\delta} t_Z l_{\delta}}{k_c l_{ст} b_{Zx}}. \quad (4.23)$$

Напряженность поля определяется для соответствующей индукции по кривым намагничивания для выбранной марки стали.

Проведя несколько таких расчетов для различных сечений зубца, можно для потока Φ_{tZ} построить кривую распределения напряженности

поля по высоте зубца (рис. 4.5, в). Площадь, ограниченная этой кривой, S_{ACDE} определяется в масштабе магнитного напряжения зубца:

$$F_Z = \int_0^{h_Z} H_x dx.$$

Зубцы в электрических машинах могут иметь сложную конфигурацию, поэтому такие расчеты выполняют лишь на ЭВМ при необходимости получения уточненных данных, при этом программы расчетов должны учитывать особенности размерных соотношений данной зубцовой зоны.

В практических расчетах оказывается достаточным приближенное решение, когда F_Z находится по (4.21) для некоторой средней расчетной напряженности H_Z и расчетной высоты зубца h_Z , для которых справедливо

$$\int_0^{h_Z} H_x dx = H_Z h_Z = F_Z.$$

При плавном изменяющихся сечениях зубцов расчетная напряженность H_Z достаточно точно находится по формуле

$$H_Z = \frac{1}{6} (H_{Zmax} + 4H_{Zcp} + H_{Zmin}). \quad (4.24)$$

Здесь H_{Zmax} , H_{Zmin} и H_{Zcp} — напряженности поля в поперечных сечениях зубца, которые определяются по индукциям в наиболее узком S_{Zmin} , наиболее широком S_{Zmax} и среднем по высоте S_{Zcp} сечениях зубца, по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} B_{Zmax} &= \frac{\Phi_{tz}}{S_{Zmin}} = B_\delta \frac{t_Z l_\delta}{b_{Zmin} l_{\sigma\tau k_c}}; \\ B_{Zmin} &= \frac{\Phi_{tZ}}{S_{Zmax}} = B_{Zmax} \frac{b_{Zmin}}{b_{Zmax}}; \\ B_{Zcp} &= \frac{\Phi_{tZ}}{S_{Zcp}} = \frac{B_{Zmax} + B_{Zmin}}{2}, \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

где b_{Zmin} , b_{Zmax} — наибольшая и наименьшая ширина зубца (рис. 4.5, б).

При прямоугольных пазах при $B_{Zmax} \leq 2,0$ Тл используется распространенный метод расчета F_Z по напряженности $H_{Z1/3}$, определенной по индукции в сечении на $1/3$ высоты зубца от его узкой части (рис. 4.5):

$$F_Z = H_{Z1/3} h_Z, \quad (4.26)$$

дающий хорошее совпадение с уточненными расчетами при небольшой разнице наибольшего и наименьшего сечений зубцов. При этом площадь прямоугольника $ACD'E'$ со сторонами $H_{Z1/3}$ и h_Z равновелика площади $ACDE$ фигуры (рис. 4.5, в).

В отдельных случаях при большей разнице b_{Zmax} и b_{Zmin} и больших насыщениях расчет проводится более детально: Зубец делится по высоте на две части, и для каждой из них определяется средняя напряженность поля указанным методом. В этом случае расчетные сечения берутся на высоте

$$\frac{1}{3} \frac{h_Z}{2} \approx 0,2 h_Z \quad \text{и} \quad \frac{1}{3} \frac{h_Z}{2} + \frac{h_Z}{2} = \frac{2}{3} h_Z \approx 0,7 h_Z$$

от наиболее узкого сечения зубца.

При расчете магнитного напряжения зубцов с резко изменяющимся по высоте сечением, например зубцов двухклеточного ротора асинхронного двигателя и короткозамкнутого ротора с фигурными пазами, зубцы также делятся по высоте на два участка с плавно изменяющимся сечением, при этом магнитное напряжение зубцов равно сумме магнитных напряжений участков.

Влияние местных изменений сечения зубца на изменение магнитного напряжения, не распространяющихся на большие участки по его высоте (углубления в стенках пазов для крепления пазовых клиньев, расширения в коронках зубцов и т.п.), в практических расчетах обычно не учитывают.

В насыщенной зубцовой зоне доля потока в пазу возрастает. Ее можно оценить, не прибегая к полному расчету поля на зубцовом делении, следующим образом.

Обозначим поток в зубце Φ_Z и поток в пазу $\Phi_{п}$ (рис. 4.6), тогда поток на зубцовом делении на высоте зубца h_{Zx} будет равен:

$$\Phi_{tZ} = \Phi_{Zx} + \Phi_{пx}. \quad (4.27)$$

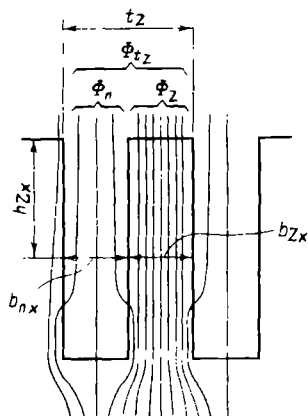
Разделив (4.27) на S_{Zx} и умножив и разделив второе слагаемое правой части на $S_{пx} = b_{пx} l_\delta$, получим

$$\frac{\Phi_{tZ}}{S_{Zx}} = \frac{\Phi_{Zx}}{S_{Zx}} + \frac{\Phi_{пx}}{S_{Zx}} \frac{S_{пx}}{S_{пx}} \quad (4.28)$$

или

$$B'_{Zx} = B_{Zx} + B_{пx} \frac{S_{пx}}{S_{Zx}}, \quad (4.29)$$

Рис. 4.6. Магнитный поток в зубцовом делении при насыщении стали зубов



где B'_{zx} — расчетная индукция, определяемая полным потоком в сечении зуба S_{zx} в предположении, что поток в пазу отсутствует; B_{zx} — действительная индукция в сечении зуба S_{zx} , т.е. индукция, определенная с учетом того, что часть потока вытесняется из зуба в паз; $B_{пх}$ — индукция в сечении паза $S_{пх}$, создаваемая вытесненной в паз частью потока.

Так как паз заполнен средой с магнитной проницаемостью μ_0 (магнитной постоянной), то

$$B_{пх} = \mu_0 H_{пх}. \quad (4.30)$$

На основании принятого допущения о конфигурации эквипотенциальных линий в зубцовой зоне напряженность поля в зубце и в пазу на одной и той же высоте h_{zx} будет одинакова, т.е.

$$H_{пх} = H_{zx}.$$

Тогда из (4.29) и (4.30) имеем

$$B'_{zx} = B_{zx} + \mu_0 H_{zx} \frac{S_{пх}}{S_{zx}}, \quad (4.31)$$

или

$$B'_{zx} = B_{zx} + \mu_0 H_{zx} k_{пх}, \quad (4.32)$$

где $k_{пх}$ — коэффициент, определяющий отношение площадей поперечных сечений паза и зуба на высоте h_{zx} :

$$k_{пх} = \frac{S_{пх}}{S_{zx}} = \frac{b_{пх} l_{\delta}}{b_{zx} l_{ст} k_c}. \quad (4.33)$$

В машинах нормального исполнения $k_{пх}$ для различных по высоте зуба сечений обычно находится в пределах

$$k_{\pi} = 0,5 \div 2,0.$$

Для определения действительной индукции в каждом сечении зубца первоначально находят расчетную индукцию по полному потоку зубцового деления:

$$B'_{Zx} = \frac{\Phi_t}{S_{Zx}} = \frac{B \delta^l \delta^t}{k_{\epsilon} l_{\text{ст}} b_{Zx}}. \quad (4.34)$$

После этого, задаваясь значениями B_{Zx} , несколько меньшими, чем B'_{Zx} , находят подбором действительную индукцию B_{Zx} и соответствующее ей значение H_{Zx} , при которых удовлетворяется равенство (4.32). Для облегчения расчета в приложении 2 приведены кривые, позволяющие определить H_{Zx} непосредственно по расчетной индукции B'_{Zx} с учетом фиксированных значений коэффициента k_{π} .

Численные значения k_{π} и $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м в (4.32) позволяют судить о значениях индукции в зубцах, при которых необходимо учитывать ответвление потока в паз. Для большинства современных электротехнических сталей при индукции $B_Z \leq 1,8$ Тл напряженность поля не превышает $H \leq 16\,000$ А/м, следовательно, при этом уровне насыщения действительная индукция в зубцах будет меньше, чем расчетная, лишь на 2–3% даже при больших значениях k_{π} , поэтому в расчетах этим изменением можно пренебречь.

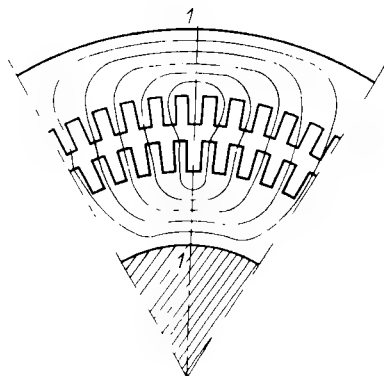
При индукциях $B_Z > 1,8$ Тл расчет следует проводить с учетом ответвления потока в паз. Естественно, что вопрос о необходимости такого учета решается при определении индукции в каждом из расчетных сечений зубца в отдельности [14].

4.4. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ЯРМ СТАТОРА И РОТОРА

Распределение потока в ярмах статора и ротора зависит от конструкции машины, размерных соотношений магнитопроводов и уровня насыщения стали. Значение потока в различных сечениях вдоль средней линии ярма непостоянно. При распределенной обмотке, например в асинхронных машинах, наибольший поток в ярмах статора и ротора имеет место в сечении 1-1 (рис. 4.7), так как на этом участке ярма потоки зубцов, находящихся на половине полюсного деления, суммируются. То же происходит в статорах синхронных машин нормального исполнения и якорях машин постоянного тока.

В станинах машин постоянного тока и ярмах явнополюсных роторов синхронных машин поток по длине средней линии меняется мало и его изменением пренебрегают.

Рис. 4.7. Магнитные силовые линии потока в магнитопроводе электрической машины с распределенной обмоткой



Распределение потока по высоте ярма также неравномерно из-за кривизны ярма и некоторого изменения его сечения в местах примыкания полюсов и под основаниями зубцов. Ближе к оси машины индукция в ярме больше, чем на периферии. Неравномерность индукции возрастает с увеличением насыщения стали и уменьшением диаметра магнитопровода.

Для точного учета влияния этих факторов необходимы трудоемкие расчеты поля с помощью ЭВМ.

В практических расчетах обычно пренебрегают кривизной магнитопровода, т.е. рассматривают поперечное сечение ярма как прямоугольник с длиной, равной длине средней магнитной силовой линии потока в ярме.

Неравномерность распределения потока по сечению ярм учитывают, либо пользуясь для расчетов специальными кривыми намагничивания, построенными для сталей ярм машин с распределенной обмоткой, либо введением в расчетные формулы коэффициента ξ .

Расчет проводят по индукции в среднем сечении ярма. Расчетные формулы для определения МДС ярм зависят от особенностей конструкции машин и даны в главах учебника, посвященных проектированию машин различных типов. Там же приводятся методы учета ответвления потока ярма ротора в вал машины при посадке сердечника ротора непосредственно на вал без тулки.

4.5. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ И КОЭФФИЦИЕНТ РАССЕЯНИЯ ПОЛЮСОВ

Магнитные силовые линии потока в явно выраженных полюсах показаны на рис. 4.8. Как видно, независимо от того, расположены полюса на статоре (на станине в машинах постоянного тока) или на роторе (в синхронных машинах), поток в полюсе состоит из двух частей. Одна

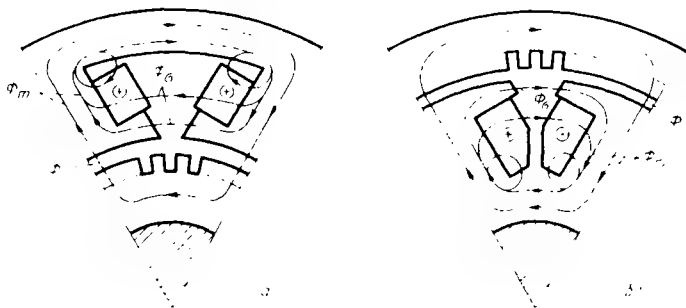


Рис. 4.8. Магнитные силовые линии в магнитопроводе электрической машины с явно выраженными полюсами:

a — на статоре; *б* — на роторе

из них поступает в воздушный зазор и формирует поле машины, передающее электромагнитную мощность. Эта часть является рабочим потоком Φ . Другая часть сцеплена только с витками обмотки возбуждения и не участвует в создании электромагнитного момента. Эту часть потока называют потоком рассеяния и обозначают Φ_σ . Магнитные силовые линии потока Φ_σ не пересекают воздушный зазор.

Суммарный поток в полюсе

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma \quad (4.35)$$

Поток Φ_m , строго говоря, непостоянен по высоте сердечника полюса, так как магнитные силовые линии потока рассеяния отводятся в межполюсное окно по всей высоте поверхности сердечника полюсов. Наибольшая величина Φ_m будет в основании полюса, а наименьшая — в полюсном наконечнике (рис. 4.8).

Поток рассеяния по высоте межполюсного окна определяется МДС обмотки возбуждения, сцепленной с каждой частью потока рассеяния, и проводимостью этой части потока в межполюсном окне (магнитным сопротивлением стали для потока рассеяния можно пренебречь, так как магнитное сопротивление воздушного промежутка значительно больше сопротивления стали).

Из рис. 4.8 видно, что магнитные силовые линии потока, выходящие из торцов полюсных наконечников, имеют по сравнению с другими наименьшую длину пути по воздуху, поэтому проводимость этой части потока рассеяния будет наибольшей. Кроме того, поток между полюсными наконечниками создается полной МДС всей обмотки полюса, поэтому поток рассеяния через кромки полюсных наконечников в основном определяет весь поток рассеяния полюсов.

Через боковые поверхности полюсов ответвляется значительно меньшая часть потока Φ_σ . Это позволяет в практических расчетах принять допущение о постоянстве потока Φ_m по всей высоте полюса. Поток Φ_m по отношению к потоку Φ при первоначальных расчетах оценивается приближенно коэффициентом рассеяния полюсов σ_m :

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi(1 + \Phi_\sigma/\Phi) = \sigma_m \Phi. \quad (4.36)$$

Значение σ_m обычно лежит в пределах 1,2–2,5 в зависимости от типа и исполнения машины.

При принятом допущении о постоянстве потока Φ_m расчетная индукция в сердечнике полюса

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S_m} = \sigma_m \frac{\Phi}{k_c b_m l_m}, \quad (4.37)$$

где S_m — сечение сердечника полюса, м^2 ; k_c — коэффициент заполнения сердечника полюса сталью; b_m и l_m — ширина и длина сердечника полюса, м.

МДС на один полюс рассчитывается по H_m , найденной для соответствующей марки стали по индукции B_m :

$$F_m = H_m h_m, \quad (4.38)$$

где h_m — высота полюса с полюсным наконечником, м.

Расчет F_m , основанный на приближенном значении σ_m , проводят лишь при предварительном определении размеров полюса. При расчете параметров и характеристик машины необходимо более точное определение Φ_σ .

Поток рассеяния Φ_σ зависит от размеров полюсов, межполюсного окна и магнитных характеристик элементов магнитной цепи машины. На рис. 4.9 приведена упрощенная схема замещения магнитной цепи явнополюсной синхронной машины. Для машин постоянного тока следующие выводы остаются такими же. Основной поток Φ и поток рассеяния Φ_σ создаются одной и той же МДС обмотки возбуждения F_v . Магнитные сопротивления путей этих потоков включены параллельно. Сопротивление потоку Φ определяется магнитными характеристиками воздушного зазора, зубцовых зон и ярма статора. Суммарное магнитное сопротивление этих участков (рис. 4.9) обозначено R_μ . Сопротивление для потока Φ_σ , определяемое, в основном, магнитной характеристикой межполюсного пространства, обозначено R_σ . Магнитные сопротивления стали полюсов и ярма ротора, общие для обоих потоков, на схеме не показаны.

Проводимость $\Lambda_\mu = 1/R_\mu$ нелинейно изменяется в зависимости от насыщения стальных участков; проводимость $\Lambda_\sigma = 1/R_\sigma$ для данных

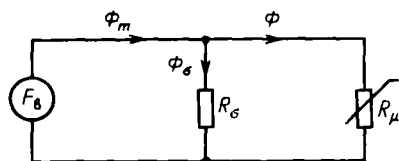


Рис. 4.9. Упрощенная схема замещения магнитной цепи явнополюсной синхронной машины

размерных соотношений полюсов постоянна и определяется размерами межполюсного пространства и полюсных наконечников.

Распределение потоков Φ и Φ_σ по параллельным ветвям пропорционально магнитным проводимостям ветвей, т.е.

$$\Phi_\sigma / \Phi = \Lambda_\sigma / \Lambda_\mu.$$

Откуда

$$\Phi_\sigma = \Phi \frac{\Lambda_\sigma}{\Lambda_\mu}. \quad (4.39)$$

Так как Λ_μ — магнитная проводимость зубцовой зоны, воздушного зазора и спинки статора, то справедливо выражение

$$\Phi = \Lambda_\mu F_{\delta Z a}, \quad (4.40)$$

где $F_{\delta Z a}$ — суммарная МДС этих участков:

$$F_{\delta Z a} = F_\delta + F_Z + F_a. \quad (4.41)$$

Из (4.39) и (4.40) получим

$$\Phi_\sigma = \Lambda_\sigma F_{\delta Z a}. \quad (4.42)$$

Выражение (4.42) показывает, что величина потока Φ_σ зависит как от проводимости межполюсного окна Λ_σ , так и от МДС $F_{\delta Z a}$ и возрастает с увеличением насыщения магнитной цепи машины.

Следует отметить, что в суммарную МДС $F_{\delta Z a}$ должна быть также включена МДС зубцовой зоны демпферной (пусковой) обмотки, а в машинах постоянного тока — компенсационной обмотки, так как она создает магнитное сопротивление только потоку Φ .

Расчет МДС F_δ , F_Z и F_a рассмотрен в предыдущих параграфах. Расчет Λ_σ связан с особенностями и размерными соотношениями явно выраженных полюсов и рассмотрен в главах, относящихся к проектированию синхронных машин и машин постоянного тока.

4.6. ХАРАКТЕРИСТИКА ХОЛОСТОГО ХОДА

При расчете электрической машины необходимо определить характеристику холостого хода, т.е. зависимость ЭДС в ее обмотках от МДС или от тока обмотки возбуждения: $E = f(F_{\text{в}})$. Так как МДС обмотки возбуждения соответствует напряжению магнитной цепи машины $F_{\text{ц}}$, а ЭДС обмотки якоря при постоянной частоте вращения пропорциональна потоку Φ , то характеристика холостого хода при этом условии эквивалентна зависимости $\Phi = f(F_{\text{ц}})$, которую называют магнитной характеристикой машины.

Напряжение магнитной цепи $F_{\text{ц}}$ представляет собой сумму МДС во всех ее участках, расчет которых рассмотрен в предыдущих параграфах.

Участки в магнитной цепи машины соединены последовательно, а магнитные напряжения каждого из них зависят от потока в участке. Поэтому при расчете $F_{\text{ц}}$ берут сумму магнитных напряжений участков, определенных для одного и того же потока. Естественно, что при расчете магнитных напряжений ряда участков в явно полюсных машинах должны быть приняты во внимание потоки рассеяния полюсов этих машин.

Если МДС цепи генератора определить для потока, при котором его ЭДС на холостом ходу при номинальной частоте вращения будет равна номинальному напряжению, то полученное значение $F_{\text{ц}}$ определит МДС возбуждения $F_{\text{в0}}$, необходимую для обеспечения такого режима. $F_{\text{в0}}$ называют МДС возбуждения холостого хода, а ток возбуждения, создающий $F_{\text{в0}}$, — током возбуждения холостого хода и обозначают $I_{\text{в0}}$.

Для характеристики работы генератора на холостом ходу необходимо знать, как изменяется напряжение на его выводах при изменении тока возбуждения. Для этого рассчитывают $F_{\text{ц}}$ при нескольких различных значениях потока, для каждого из них находят соответствующую ЭДС и строят характеристику холостого хода $E = f(F_{\text{в}})$ или $E = f(I_{\text{в}})$.

В двигателях ЭДС обмотки определяется напряжением питающей сети и для режима холостого хода может быть с некоторым приближением определена до расчета магнитной цепи. Поэтому характеристика холостого хода двигателя имеет несколько иной по сравнению с генератором смысл. Она показывает, какой должна быть МДС или каким должен быть ток возбуждения холостого хода при определенной ЭДС машины.

В асинхронных двигателях ток, создающий намагничивающую силу возбуждения (намагничивающий ток), потребляется из питающей сети. Он также зависит от МДС магнитной цепи, но при неизменной ЭДС обмотки статора намагничивающий ток не будет изменяться. Поэтому характеристику холостого хода для асинхронных двигателей не рассчитывают. Для определения $I_{\text{ц}}$ достаточно рассчитать МДС магнитной цепи для одного значения потока, соответствующего режиму холостого хода.

Для двигателей постоянного тока и синхронных строят полную характеристику, однако для дальнейших расчетов удобнее пользоваться не

характеристикой холостого хода, а магнитной характеристикой, т.е. непосредственно зависимостью $\Phi = f(F_{\text{ц}})$, получаемой при расчете $F_{\text{ц}}$ для нескольких значений потока.

Конкретные методы расчета МДС и характеристик холостого хода приведены в главах учебника, посвященных проектированию машин различных типов.

4.7. ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ НА ПОЛЕ МАШИНЫ

Если работающую на холостом ходу электрическую машину нагрузить, то из-за увеличения тока электромагнитное поле в ней изменится, так как МДС тока нагрузки создаст поле, называемое полем реакции якоря. Под действием реакции якоря результирующий поток в машине может уменьшаться или увеличиваться в зависимости от ряда условий.

Влияние реакции якоря на характеристики машины всегда учитывают при расчете нагрузочных режимов. Прямой расчет потока, созданного двумя различными намагничивающими силами — возбуждения и реакции якоря, по-разному распределенными в активном объеме машины, очень сложен, поэтому в инженерной практике поступают следующим образом. Сначала рассчитывают магнитную цепь машины и поток при холостом ходе. Потом проводят расчет МДС реакции якоря и определяют ее влияние на поле потока возбуждения.

При расчете приходится также учитывать изменение ЭДС обмотки при нагрузке машины по сравнению с холостым ходом, вызванное падением напряжения на внутреннем сопротивлении из-за увеличения тока.

В различных типах машин реакция якоря сказывается по-разному. В асинхронных двигателях поток создается намагничивающим током статора, который определяется сопротивлением магнитной цепи и ЭДС обмотки. При расчетах приближенно принимают, что изменение намагничивающего тока при различных нагрузках обусловлено только изменением ЭДС, связанным с падением напряжения на сопротивлении обмотки статора. ЭДС при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке в процентном отношении изменяется мало, поэтому номинальный режим работы асинхронных двигателей часто рассчитывают по данным магнитной цепи, определенным для холостого хода. При более точных расчетах принимают, что намагничивающий ток изменяется в зависимости от ЭДС. Так же поступают при расчете пусковых характеристик и в тех случаях, когда увеличение падения напряжения на сопротивлении обмотки статора при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке заметно влияет на ЭДС.

В синхронных машинах и машинах постоянного тока различают продольную и поперечную реакции якоря, т.е. раздельно рассматривают составляющие поля реакции: совпадающую с осью поля возбуждения и нормальную к нему. И продольная, и поперечная реакции якоря оказывают

влияние на поле машины, поэтому при расчетах приходится определять МДС возбуждения, необходимую для обеспечения работы машины с номинальными данными, которая в общем случае отличается от МДС возбуждения холостого хода $F_{в0}$.

Определение МДС возбуждения при нагрузке и учет влияния реакции якоря на характеристики рассматриваются в соответствующих главах расчета машин постоянного тока и синхронных.

Контрольные вопросы

1. Какие допущения принимают при подразделении магнитной цепи электрической машины на участки для расчета МДС?
2. Что учитывает коэффициент воздушного зазора? Как и почему он изменится, если при неизменных размерах пазов уменьшить воздушный зазор машины?
3. Почему происходит отставание потока в пазы при больших индукциях в зубцах сердечников? Как учитывают это явление при расчете магнитной цепи?
4. Какие допущения принимают при расчете магнитных напряжений ярм статора и ротора?
5. Как и почему изменяется поле машины с увеличением ее нагрузки?

Глава пятая

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Параметрами электрических машин называют активные и индуктивные сопротивления ее обмоток. К параметрам относят также момент инерции ротора, значение которого входит в уравнение движения электрической машины.

5.1. АКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК

Общим выражением для расчета активного сопротивления фазы обмотки электрических машин является формула

$$r = k_r \rho_\nu \frac{L}{q_{эф} a}, \quad (5.1)$$

где ρ_ν — удельное сопротивление материала проводника, Ом/м, при расчетной температуре ν , °С; L — длина проводника фазы обмотки, м; k_r — коэффициент вытеснения тока; $q_{эф}$ — площадь поперечного сечения эффективного проводника, м²; a — число параллельных ветвей обмотки.

Удельные сопротивления некоторых наиболее часто применяемых в электрических машинах проводниковых материалов для различных расчетных температур приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Удельные электрические сопротивления материала проводников обмоток

Тип обмотки	Материал	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м, при температуре, °С		
		20	75	115
Обмотки из медных обмоточных проводов или неизолированной медной проволоки или шины	Медь	$\frac{1}{57} 10^{-6}$	$\frac{1}{47} 10^{-6}$	$\frac{1}{41} 10^{-6}$
Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей	Алюминиевые шины	$\frac{1}{35} 10^{-6}$	$\frac{1}{28} 10^{-6}$	$\frac{1}{26} 10^{-6}$
	Алюминий литой	$\frac{1}{30} 10^{-6}$	$\frac{1}{24} 10^{-6}$	$\frac{1}{22} 10^{-6}$

Примечание. Удельное сопротивление алюминия после заливки в пазы ротора несколько повышается в связи с образованием некоторого количества раковин (воздушных включений) и с изменением структуры при охлаждении в узких пазах или участках паза. Поэтому в расчетах принимают удельные сопротивления литой алюминиевой обмотки роторов асинхронных двигателей равными $10^{-6}/21,5$ Ом·м при температуре 75°C и $10^{-6}/20,5$ Ом·м при температуре 115°C .

Согласно ГОСТ 183-74 для обмоток, предельно допустимые превышения температур которых соответствуют классам нагревостойкости А, Е и В, расчетная температура принимается равной 75°C , а для обмоток, предельно допустимые превышения температуры которых соответствуют классам нагревостойкости F и H, 115°C .

Длина проводника фазы распределенной обмотки

$$L = l_{\text{cp}} w, \quad (5.2)$$

где l_{cp} — средняя длина одного витка:

$$l_{\text{cp}} = 2(l_{\text{п}} + l_{\text{л}}). \quad (5.3)$$

Длину пазовой части витка $l_{\text{п}}$ принимают равной длине сердечника. Длина лобовой части $l_{\text{л}}$ зависит от типа и конструкции обмотки, ее шага и внутреннего диаметра статора (наружного диаметра ротора или якоря).

В машинах постоянного тока общая длина обмотки якоря

$$L = l_{\text{cp}} w = l_{\text{cp}} N/2, \quad (5.4)$$

где N — число эффективных проводников в обмотке.

Число параллельных ветвей обмотки якоря в отличие от машин переменного тока обозначают $2a$, поэтому активное сопротивление одной па-

параллельной ветви обмотки якоря

$$r_{\text{ветви}} = k_r \frac{L}{q_{\text{эф}} \cdot 2a}, \quad (5.5)$$

а сопротивление всей обмотки

$$r = k_r \frac{L}{q_{\text{эф}} (2a)^2}. \quad (5.6)$$

Коэффициент вытеснения тока k_r зависит от характера распределения тока по сечению проводников и представляет собой отношение активного сопротивления проводника при неравномерном распределении плотности тока по сечению к сопротивлению того же проводника при одинаковой плотности тока во всех точках его сечения.

Проводники, расположенные в пазах электрических машин находятся в зоне полей пазового рассеяния. Если в обмотке протекает переменный ток, то в проводниках возникают вихревые токи, которые, накладываясь на основной ток проводника, увеличивают или уменьшают плотность тока на различных участках их сечения.

Равномерность распределения плотности тока нарушается, и активное сопротивление проводника увеличивается.

При постоянном токе в обмотке вихревые токи не возникают и $k_r = 1$. Поэтому сопротивление проводников при постоянной по всему сечению плотности тока называют сопротивлением постоянному току.

Если проводник или какой-либо участок проводника расположен в воздухе и не находится в зоне сильного электромагнитного поля машины, то плотность тока во всех точках его сечения при расчете принимают одинаковой. Так поступают, например, в большинстве случаев при расчете сопротивлений лобовых частей обмоток, для которых принимают $k_r = 1$. Некоторое увеличение активного сопротивления, связанное с неравномерностью распределения плотности тока из-за проявления поверхностного эффекта, влияния полей лобового рассеяния, изгибов проводников и т.п., учитывают приближенно, относя его к добавочным потерям.

Расчет распределения плотности тока по сечению проводников, находящихся в пазах магнитопровода, показал, что наибольшая плотность тока будет в верхних участках поперечных сечений проводников, т.е. в участках, расположенных ближе к раскрытию паза в воздушный зазор (рис. 5.1). Ток как бы вытесняется в верхнюю часть сечения проводника, поэтому такое явление называют эффектом вытеснения тока, а коэффициент k_r , введением которого учитывают изменение активного сопротивления под действием этого эффекта, — коэффициентом вытеснения тока.

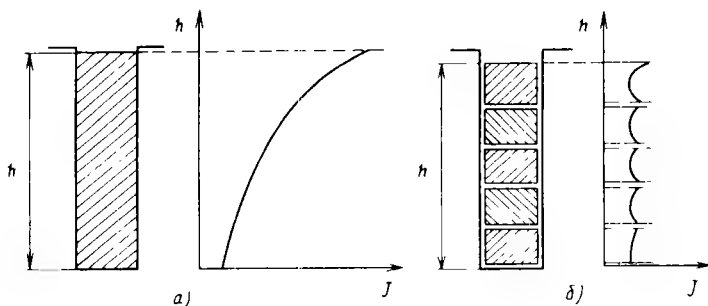


Рис. 5.1. Распределение плотности потока в проводниках обмотки под действием эффекта вытеснения тока:

a - при одном массивном проводнике в пазу; *б* - при нескольких проводниках в пазу

Эффект вытеснения тока приводит к увеличению расчетного активного сопротивления проводника (всегда $k_r \geq 1$). Значение коэффициента k_r зависит от частоты тока в обмотке, удельного сопротивления проводникового материала, размеров, числа и расположения проводников в пазу и от размеров пазу.

Методы определения k_r приводятся в главах учебника, относящихся к расчету сопротивлений обмоток машин конкретных типов.

Площадь поперечного сечения эффективного проводника определяется размерами обмоточного провода и числом элементарных проводников в одном эффективном. Для распределенных обмоток электрических машин не применяют прямоугольные провода площадью поперечного сечения более 17 — 20 мм², так как при большем их сечении резко возрастают потери на вихревые токи, наводимые полем машины.

Распределенные обмотки из круглого провода наматывают обмоточными проводами площадью поперечного сечения, не превышающей 2,5 мм², так как при большем сечении не удастся достичь удовлетворительного заполнения пазу из-за возрастающей с диаметром упругости провода. В связи с этим обмотки с расчетной площадью поперечного сечения эффективного проводника, превышающей указанную цифру, наматывают не одним обмоточным проводом, а несколькими параллельными проводами одновременно. Такие проводники в отличие от параллельных ветвей в схеме обмотки (см. гл. 3) называют элементарными. Несколько элементарных проводников образуют один эффективный, площадь поперечного сечения которого

$$q_{эф} = n_{эл} q_{эл}, \quad (5.7)$$

где $n_{эл}$ — число элементарных проводников в одном эффективном; $q_{эл}$ — площадь поперечного сечения элементарного проводника, при

этом принимают допущение, что плотность тока во всех элементарных проводниках, составляющих один эффективный, одинакова и размеры катушек не зависят от $n_{эл}$.

Число элементарных проводников в обмотке не принимают во внимание в электромагнитных расчетах и учитывают только при расчете коэффициента заполнения паза.

5.2. ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК

Индуктивное сопротивление обмоток электрических машин определяется их взаимной индуктивностью и собственной индуктивностью. Индуктивное сопротивление взаимной индукции является характеристикой главного поля машины, поток которого сцеплен с витками как первичной, так и вторичной обмоток. Методы расчета индуктивных сопротивлений взаимной индукции различны для разных типов машин. Они рассматриваются в соответствующих главах учебника.

Индуктивные сопротивления самоиндукции, или, как их называют, индуктивные сопротивления рассеяния обмоток, характеризуют поля рассеяния, потоки которых сцеплены с витками каждой из обмоток в отдельности. Методы их расчета для машин различных типов имеют много общего. Поля рассеяния статора и ротора рассматривают раздельно. Потоки рассеяния каждой из обмоток, кроме того, подразделяют на три составляющие: пазового, лобового и дифференциального рассеяния. Соответственно подразделению потоков вводят понятия сопротивлений пазового, лобового и дифференциального рассеяний, сумма которых определяет индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора или ротора. Для расчета сопротивлений рассеяния помимо размеров магнитопровода и обмоточных данных машины необходимо знать удельные коэффициенты магнитной проводимости пазового $\lambda_{п}$, лобового $\lambda_{л}$ и дифференциального рассеяний $\lambda_{д}$. Под удельной магнитной проводимостью понимают магнитную проводимость, отнесенную к единице расчетной длины магнитопровода с учетом ослабления поля над радиальными вентиляционными каналами:

$$l'_\delta = l_\delta \quad 0,5 n_k b_k, \quad (5.8)$$

где n_k и b_k — число и ширина радиальных вентиляционных каналов в сердечнике машины.

Так как расчет коэффициентов магнитной проводимости проводят всегда на единицу длины, то слово "удельной" в тексте обычно опускают.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния. Предположим, что в пазу с высотой $h_{п}$ расположено $N_{п}$ проводников однослойной обмотки (рис. 5.2). Примем следующие допущения: проводники с током распределены равномерно по всей площади поперечного се-

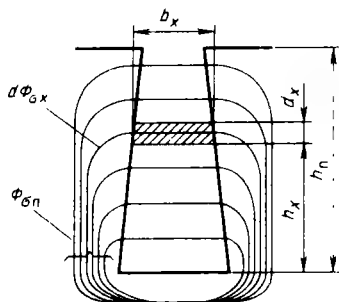


Рис. 5.2. К расчету коэффициента магнитной проводимости потока пазового рассеяния

чения паза, плотность тока в каждой точке сечения паза постоянна, магнитная проницаемость стали магнитопровода равна бесконечности, магнитные линии потока рассеяния в пазу прямолинейны и направлены нормально к оси паза. Все рассмотрение будем проводить относительно единицы условной длины l'_δ . Для того чтобы учесть потокосцепление потока рассеяния с проводниками обмотки, выделим в пазу на высоте h_x от дна паза элемент высотой dx , представляющий собой трубку потока рассеяния паза. Поток этого элемента на единицу длины обозначим $d\Phi_{0x}$. Создаваемое им потокосцепление с проводниками обмотки N_x , расположенными в пазу ниже выделенного элемента, равно:

$$d\Psi_x = d\Phi_{0x} N_x. \quad (5.9)$$

При принятом допущении об отсутствии насыщения стали можно записать

$$d\Phi_{0x} = \mu_0 F_x d\Lambda_x, \quad (5.10)$$

где $d\Lambda_x = dx/b_x$ — магнитная проводимость выделенного элемента паза; b_x — ширина паза на высоте h_x .

Учитывая, что $F_x = N_x I$, где I — ток в одном проводнике, из (5.9) и (5.10) получаем

$$d\Psi_x = \mu_0 I N_x^2 \frac{dx}{b_x}.$$

Потокосцепление всего потока рассеяния паза со всеми проводниками, расположенными в данном пазу, равно:

$$\Psi_{\Pi} = \mu_0 I \int_0^{h_{\Pi}} N_x^2 \frac{dx}{b_x}, \quad (5.11)$$

откуда индуктивное сопротивление проводников одного паза на единицу длины

$$x'_{\sigma\Pi} = \omega L_{\Pi} = \omega \frac{\Psi_{\Pi}}{I} = \omega \mu_0 \int_0^{h_{\Pi}} N_x^2 \frac{dx}{b_x},$$

или

$$x'_{\sigma\Pi} = 2\pi f \mu_0 N_{\Pi}^2 \int_0^{h_{\Pi}} \left(\frac{N_x}{N_{\Pi}} \right)^2 \frac{dx}{b_x}, \quad (5.12)$$

где N_{Π} — полное число проводников в пазу.

Интеграл в правой части выражения (5.12) определяет коэффициент магнитной проводимости потока пазового рассеяния с учетом потоко-сцепления с проводниками паза. Его обозначают $\lambda_{\Pi\Psi}$:

$$\lambda_{\Pi\Psi} = \int_0^{h_{\Pi}} \left(\frac{N_x}{N_{\Pi}} \right)^2 \frac{dx}{b_x}. \quad (5.13)$$

Так как при расчете индуктивного сопротивления рассеяния учет потоко-сцепления обязателен, индекс Ψ в обозначении обычно опускают, тогда

$$x'_{\sigma\Pi} = 2\pi f \mu_0 N_{\Pi}^2 \lambda_{\Pi}. \quad (5.14)$$

Выразив N_{Π} через число витков фазы (при условии, что обмотка фазы расположена в Z/m пазах), получим выражение для индуктивного сопротивления пазового рассеяния всей фазы с учетом условной длины поля рассеяния:

$$x_{\sigma\Pi} = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{pq} l_{\delta}' \lambda_{\Pi}. \quad (5.15)$$

Расчетные формулы для определения λ_{Π} получают из (5.13) с учетом конфигурации пазов и типа обмотки.

В частном случае коэффициент магнитной проводимости прямоугольного паза, полностью занятого проводниками однослойной обмотки,

$$\begin{aligned} \lambda_{\Pi} &= \int_0^{h_{\Pi}} \left(\frac{N_x}{N_{\Pi}} \right)^2 \frac{dx}{b_x} = \int_0^{h_{\Pi}} \left(\frac{S_x}{S_{\Pi}} \right)^2 \frac{dx}{b_x} = \\ &= \int_0^{h_{\Pi}} \left(\frac{h_x}{h_{\Pi}} \right)^2 \frac{dx}{b_{\Pi}} = \frac{1}{3} \frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi}}, \end{aligned} \quad (5.16)$$

так как в прямоугольном пазу ширина $b_x = b_{\Pi}$ постоянна и не зависит от высоты, а при принятом допущении о равномерности распределения проводников по площади сечения паза справедливо равенство

$$\frac{N_x}{N_{\Pi}} = \frac{S_x}{S_{\Pi}} = \frac{h_x}{h_{\Pi}},$$

где S_{Π} — площадь поперечного сечения паза, занятая проводниками с током, а S_x — часть площади сечения паза, ограниченная высотой h_x .

В более сложных случаях, например когда проводники с током занимают не весь паз и конфигурация паза отлична от прямоугольной, коэффициент проводимости пазового рассеяния

$$\lambda_{\Pi} = \int_0^{h_{\Pi}} \left(\frac{S_x}{S_{\Pi}} \right)^2 \frac{dx}{b_x}, \quad (5.17)$$

где S_{Π} и S_x — площади поперечного сечения паза, занятые проводниками обмотки.

Интегрирование проводят по частям паза, причем паз подразделяют по высоте таким образом, чтобы в пределах каждой части ширина паза могла быть выражена аналитически в зависимости от высоты, а плотность тока в каждой точке ее сечения была одинаковой. Например, для прямоугольного паза со свободной от обмотки верхней — клиновой частью (рис. 5.3) таких участков интегрирования будет три: нижняя часть паза, занятая изоляцией высотой h_0 , часть паза с однослойной обмоткой высотой h_1 и клиновидная часть с высотой h_2 .

Коэффициент магнитной проводимости всего паза равен:

$$\begin{aligned} \lambda_{\Pi} &= \lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 = \int_0^{h_0} \left(\frac{S_x}{S_{\Pi}} \right)^2 \frac{dx}{b_x} = \\ &+ \int_0^{h_1} \left(\frac{S_x}{S_{\Pi}} \right)^2 \frac{dx}{b_x} + \int_0^{h_2} \left(\frac{S_x}{S_{\Pi}} \right)^2 \frac{dx}{b_x} = \\ &= \frac{1}{3} \frac{h_1}{b} + \frac{h_2}{b} \end{aligned} \quad (5.18)$$

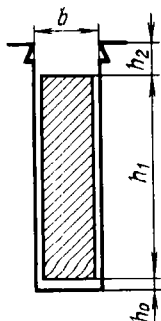


Рис. 5.3. К расчету λ_{Π} прямоугольного паза с однослойной обмоткой

В двухслойных обмотках с укороченным шагом в части пазов размещены стороны катушек, принадлежащих разным фазам, поэтому токи в них сдвинуты во времени. Влияние этого на потокосцепление пазового рассеяния в расчетных формулах учитывается коэффициентами k_β и k_β' , зависящими от укорочения шага обмотки.

Чтобы не производить интегрирование при каждом расчете для наиболее часто встречающихся конфигураций пазов, оно выполнено заранее и приводится в виде справочных таблиц в соответствующих главах.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния принципиально мог бы быть найден методом, аналогичным описанному выше, однако индуктивное сопротивление лобовых частей обмоток определяется не только индуктивностью каждой из катушек, но и взаимноиндуктивными связями лобовых частей всех катушек обмотки. Это значительно усложняет расчет, так как поле рассеяния в зоне расположения лобовых частей имеет более сложный характер, чем в пазах. Криволинейность проводников в лобовых частях, разнообразные в различных машинах конфигурации поверхностей ферромагнитных деталей, окружающих лобовые части, и сложный характер индуктивных связей усложняют аналитический расчет λ_Π и требуют для его выполнения ряда упрощающих допущений. В практических расчетах коэффициент магнитной индукции лобового рассеяния обмотки λ_Π определяют по относительно простым эмпирическим формулам, полученным на основании многочисленных экспериментальных исследований, проведенных для различных типов и конструкций обмоток. При вычислении значение λ_Π также относят к единице условной длины l_δ' .

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния. Полем дифференциального рассеяния называют всю совокупность полей различных гармоник в воздушном зазоре, не участвующих в создании электромагнитного момента. Потокосцепление этих полей с витками обмотки определенным образом увеличивает ее индуктивное сопротивление, что учитывается коэффициентом магнитной проводимости дифференциального рассеяния λ_Δ . Его значение зависит от размерных соотношений воздушного зазора, числа пазов на полюс и фазу q , размеров шлица, зубцовых делений, степени демпфирования полей высших гармоник токами в проводниках, расположенных на противоположной от рассматриваемой обмотки стороне воздушного зазора, и от ряда других факторов.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки определяют по формуле, аналогичной (5.15), в которую вместо λ_Π подставляют сумму коэффициентов магнитных проводимостей пазового, лобового и дифференциального рассеяния:

$$x_\sigma = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{pq} l_\delta' \Sigma \lambda = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w}{100} \right)^2 \frac{l_\delta'}{pq} \Sigma \lambda, \quad (5.19)$$

где $\Sigma \lambda = \lambda_\Pi + \lambda_\Pi + \lambda_\Delta$.

В асинхронных машинах индуктивное сопротивление фазы обмотки статора обозначают x_1 , а обмотки ротора x_2 . В синхронных машинах индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора обозначают $x_{\sigma 1}$. В машинах постоянного тока индуктивное сопротивление обмотки якоря непосредственно не рассчитывают, однако коэффициенты магнитной проводимости рассеяния определяют для расчета реактивной ЭДС секций обмотки.

Расчетные формулы для определения коэффициентов магнитных проводимостей пазового, лобового и дифференциального рассеяния непосредственно связаны с формой и размерами пазов, типом и конструкцией обмоток и размерными соотношениями зубцовой зоны. Эти факторы для разных типов машин различны. Расчет коэффициентов магнитных проводимостей рассеяния асинхронных и синхронных машин а также машин постоянного тока приводится в соответствующих главах.

Индуктивные и активные сопротивления обмоток являются коэффициентами в уравнениях напряжений. Эти параметры входят как в дифференциальные уравнения, описывающие переходные и установившиеся режимы, так и в комплексные уравнения, описывающие только установившиеся процессы.

5.3. МОМЕНТ ИНЕРЦИИ

Момент инерции характеризует динамические свойства машины. Он входит в уравнение движения

$$J \frac{d\omega_p}{dt} \pm M_c = M_\Sigma, \quad (5.20)$$

где J — момент инерции; ω_p — угловая скорость ротора; M_c — момент сопротивления; M_Σ — электромагнитный момент.

Момент инерции вращающегося тела равен сумме произведений масс всех его точек на квадраты их расстояний от оси вращения. Значение момента инерции тела относительно оси OZ может быть получено из интеграла

$$J_Z = \int_V \rho^2 dV,$$

где ρ — расстояние до оси вращения OZ ; dV — элемент объема.

Для тел, имеющих простую геометрическую форму (цилиндр, диск и т.п.), значения моментов инерции приводятся в справочниках. Например, момент инерции полого цилиндра массой m , длиной l , внешним радиусом R_1 и внутренним R_2 равен:

$$J = \frac{m}{12} (3R_1^2 + 3R_2^2 + l^2).$$

Момент инерции сплошного цилиндра ($R_2 = 0$; $R_1 = R$)

$$J = \frac{m}{12} (3R^2 + l^2).$$

Как видно, при одном и том же объеме момент инерции тела с меньшим радиусом будет меньше, чем при большом радиусе.

Момент инерции является мерой инертности тела, поэтому двигатели с малым моментом инерции разгоняются с большими ускорениями и быстро достигают установившейся частоты вращения. Для эксплуатации в режимах с частыми пусками стремятся выполнить двигатели с малыми моментами инерции, для чего уменьшают диаметры роторов при соответствующем увеличении длин их сердечников.

В приводах с ударной или пульсирующей нагрузкой (поршневые компрессоры) целесообразно применять двигатели, имеющие большой момент инерции, т.е. с относительно большим диаметром ротора и малой длиной. При постоянной частоте вращения кинетическая энергия вращающегося тела пропорциональна его моменту инерции, поэтому двигатели с большим моментом инерции имеют большую кинетическую энергию, за счет которой преодолеваются толчки нагрузки.

Ввиду сложности конфигурации роторов электрических машин и наличия в них элементов с различной удельной массой (сталь сердечников, обмотка, изоляция, детали крепления) для расчета момента инерции ротор подразделяют на несколько частей, имеющих сравнительно простую конфигурацию, и для каждой из них определяют J , руководствуясь формулами специальных методик.

При расчете динамических характеристик двигателя вместе с приводом учитывают моменты инерции механизмов, соединенных с валом двигателя, значения которых приводят к частоте вращения ротора. Общий приведенный момент инерции определяют по формуле

$$J_{\text{пр}} = J_1 + \sum \frac{J_{(i+1)}}{j_i^2}, \quad (5.21)$$

где J_1 — момент инерции ротора двигателя; $J_{(i+1)}$ — моменты инерции механизмов, соединенных с валом ротора; j_i — передаточное отношение i -й передачи, равное отношению частот вращения данного механизма и ротора двигателя.

Контрольные вопросы

1. Что мы называем параметрами электрической машины?
2. Почему сопротивление литой алюминиевой обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя рассчитывают по удельному сопротивлению, большему, чем удельное сопротивление литого алюминия?
3. Зависит ли коэффициент пазового рассеяния от числа проводников в пазу? от расположения проводников в пазу? от силы тока в обмотке?

4. Как влияют вихревые токи на активное сопротивление обмотки электрической машины? В каких обмотках и при каких условиях необходимо учитывать это изменение?

5. Как влияет момент инерции ротора на пусковые свойства электродвигателя?

Глава шестая

ПОТЕРИ И КПД

6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОТЕРЬ

При работе электрической машины часть потребляемой энергии всегда преобразуется в тепловую и затрачивается на нагревание проводников обмоток и других частей машины. Разность между потребляемой энергией и отдаваемой называют потерями, так как эта часть энергии не используется для полезной деятельности и как бы "теряется" в процессе преобразования электрической энергии в механическую (в двигателях) или механической в электрическую (в генераторах) [14].

Потери энергии рассчитывают для установившегося режима и для удобства сравнения с мощностью машины оценивают за единицу времени, т.е. в единицах мощности: ватт или киловатт. Потери в машинах необходимо знать не только для определения КПД, но и для расчета температуры ее отдельных частей. Поэтому расчету потерь в электрических машинах уделяют много внимания.

В электрических машинах различают основные и добавочные потери. Основные потери в зависимости от вызывающих их физических процессов подразделяют на электрические, магнитные, механические и вентиляционные. Каждый вид потерь локализован в определенных участках объема машины.

6.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Электрические потери возникают в проводниках обмоток, соединительных шинах и проводах, в переходных контактах щетки коллектор или щетки – контактные кольца.

Потери в обмотках, соединительных шинах и проводах. Электрические потери P_z , Вт, в обмотках и всех токоведущих частях электрической машины рассчитывают по формуле

$$P_z = \sum I_i^2 r_{\nu i}, \quad (6.1)$$

где $r_{\nu i}$ – сопротивление данной обмотки или i -го участка токопровода, Ом, по которому протекает ток I_i , рассчитанное при необходимости с учетом влияния эффекта вытеснения тока.

Для расчета потерь сопротивление $r_{\text{л}}$ должно быть приведено к расчетной температуре: для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости А, Е и В 75°C , с изоляцией класса F или H 115°C (соответственно $r_{75^{\circ}}$ и $r_{115^{\circ}}$). Если по обмотке протекает постоянный ток, то для расчета электрических потерь часто используют выражение

$$P_{\text{э}} = UI, \quad (6.2)$$

где I — ток в обмотке, А; U — напряжение на концах обмотки, В.

Электрические потери рассчитывают отдельно для каждой из обмоток — обмотки фазы машины переменного тока, обмотки якоря, возбуждения и т.п., так как эти данные используют в дальнейшем для тепловых расчетов электрических машин.

Обычно электрические потери в обмотках возбуждения синхронных машин и в обмотках параллельного или независимого возбуждения машин постоянного тока выделяют из общей суммы электрических потерь и относят к потерям на возбуждение. Для синхронных машин потери в обмотках возбуждения учитывают в тепловых расчетах, а при определении КПД к потерям на возбуждение относят мощность, потребляемую возбудителем, если он расположен на одном валу с ротором или приводится во вращение от вала ротора.

При определении КПД машин постоянного тока учитывают также электрические потери в регулировочных реостатах. На тепловое состояние машин эти потери влияния не оказывают, так как реостаты располагаются отдельно от машин.

В некоторых обмотках на их различных участках протекают разные токи. В этом случае сопротивление одного из участков приводят к току другого. Так, при расчете сопротивления фазы обмотки короткозамкнутого ротора асинхронной машины сопротивление замыкающих колец приводят к току стержней обмотки.

Потери в переходных контактах. Электрические потери в переходных контактах щетки — коллектор или щетки — контактные кольца зависят от тока, протекающего через контакт $I_{\text{к.к}}$, А, и падения напряжения под щетками $\Delta U_{\text{щ}}$, В:

$$P_{\text{э.щ}} = k \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{к.к}}. \quad (6.3)$$

В машинах постоянного тока и синхронных коэффициент $k = 2$, так как ток проходит через два переходных контакта: под положительной и отрицательной щетками. В асинхронных машинах с фазным ротором $k = m$, где m — число фаз обмотки.

Потери в переходных контактах не могут быть рассчитаны точно, так как падение напряжения под щетками непостоянно и зависит от режима работы, состояния трущихся поверхностей, удельного давления щеток на коллектор или контактные кольца и от ряда других факторов,

изменяющихся во время эксплуатации машины. В расчетах используют значение $\Delta U_{\text{щ}}$, взятое из технической характеристики конкретной марки щеток, которое принимают постоянным. Из-за того что $P_{\text{э.щ}}$ составляют лишь несколько процентов от общей суммы потерь в машине, погрешность расчета при этом незначительна.

6.3. МАГНИТНЫЕ ПОТЕРИ

Магнитные потери, или, как их чаще называют, потери в стали, $P_{\text{ст}}$ возникают в участках магнитопровода с переменным магнитным потоком: в статорах асинхронных и синхронных машин и якорях машин постоянного тока. В роторах синхронных машин, полюсах и станине машин постоянного тока поток постоянный и основные потери в стали отсутствуют. В роторах асинхронных машин частота тока и потока в номинальном режиме очень мала ($f_2 = s_{\text{ном}} f$), поэтому потерями в стали ротора пренебрегают.

Основные потери в стали состоят из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи. Они зависят от марки стали, толщины листов магнитопровода, частоты перемагничивания и индукции. На них оказывают влияние также различные технологические факторы. В процессе штамповки листов магнитопровода образуется наклеп, который изменяет структуру стали по кромкам зубцов и увеличивает потери на гистерезис. Потери на вихревые токи возрастают в результате замыканий части листов магнитопровода между собой, возникающих из-за заусенцев, которые образуются при опиловке пазов, при забивке пазовых клиньев, из-за чрезмерной опрессовки магнитопровода и ряда других причин.

Точных аналитических формул для расчета основных потерь в стали, учитывающих влияние приведенных выше факторов, не существует. Потери в стали рассчитывают по формулам, основанным на результатах многолетних теоретических и экспериментальных исследований.

Основные потери в стали определяют как сумму потерь в зубцах и в ярме магнитопровода:

$$P_{\text{ст.осн}} = \sum k_{\text{дi}} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{\beta} B_i^2 m_i, \quad (6.4)$$

где $k_{\text{дi}}$ — коэффициент, учитывающий увеличение потерь в стали зубцов или ярма магнитопровода по технологическим причинам; $P_{1/50}$ — удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл, Вт/кг; f — частота перемагничивания, Гц. Для машин переменного тока f равна частоте питающей сети; для расчета потерь в стали якоря машин постоянного тока $f = pn/60$; B_i — индукция в зубцах или ярме магнитопровода, Тл; m_i — масса зубцов или ярма магнитопровода, кг; β — показатель степени, зависящий от марки стали и толщины листов магнитопровода.

Значения $p_{1/50}$ и β приводятся в технических характеристиках статей; данные по выбору k_d и расчету массы стали зубцов и ярма приведены в главах учебника, посвященных проектированию конкретных видов машин.

6.4. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ ПОТЕРИ

Механические потери в электрических машинах состоят из потерь на трение в подшипниках, на трение вращающихся частей машины о воздух или газ и потерь на трение в скользящих контактах щетки — коллектор или щетки — контактные кольца. К вентиляционным потерям относят затраты мощности на циркуляцию охлаждающего воздуха или газа.

В машинах с самовентиляцией на вентиляционные потери расходуются часть подводимой к машине мощности. В машинах с принудительной вентиляцией или с жидкостным охлаждением для циркуляции охлаждающего агента — воздуха, газа или жидкости — устанавливают вентиляторы или компрессоры с независимым приводом. Потребляемая их двигателями мощность учитывается при расчете КПД основной машины как потери на вентиляцию.

Расчетные формулы, позволяющие найти каждую из составляющих этих видов потерь, основаны на экспериментальных данных и отражают зависимость потерь от конструкции машины, ее размеров, частоты вращения и от ряда других факторов. При проектировании машин, конструкция которых несущественно отличается от серийных, в расчете можно использовать эмпирические формулы, дающие непосредственно сумму вентиляционных и механических потерь (за исключением потерь на трение в скользящих контактах).

Расчет механических и вентиляционных потерь $P_{\text{мех}}$ может быть выполнен лишь после завершения проектирования и определения размеров всех деталей машины. Во время учебного проектирования при разработке конструкции машины следует иметь в виду качественную зависимость этого вида потерь от размерных соотношений машины. Потери на трение и вентиляцию резко увеличиваются в машинах с большим диаметром ротора и большой частотой вращения. Так, в большинстве машин эти потери пропорциональны квадрату частоты вращения и квадрату наружного диаметра статора.

Так как формулы для расчета механических потерь выведены для конкретных типов и конструктивного исполнения машин, то они приводятся в соответствующих главах учебника. Там же приведены формулы для расчета потерь на трение в скользящих контактах.

6.5. ДОБАВОЧНЫЕ ПОТЕРИ.

В электрических машинах возникают также потери, вызванные физическими процессами, происходящими при преобразовании энергии, отличными от процессов, вызывающих основные потери. Они получили название добавочных. Добавочные потери, как правило, меньше основных потерь, рассмотренных в предыдущих параграфах.

Некоторые виды добавочных потерь возникают при холостом ходе и не изменяются при нагрузке машины, другие появляются только с увеличением тока нагрузки. В зависимости от этого первый вид потерь называют добавочными потерями холостого хода, а второй — добавочными потерями при нагрузке.

К добавочным потерям холостого хода относят поверхностные $P_{\text{пов}}$ и пульсационные потери $P_{\text{пуль}}$:

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов}} + P_{\text{пуль}}. \quad (6.5)$$

Поверхностные потери возникают из-за пульсаций индукции в воздушном зазоре. При работе машины индукция в каждой отдельно взятой точке, расположенной на одной из поверхностей магнитопровода, обращенных к зазору, будет изменяться от наибольшего значения (когда против нее на противоположной стороне зазора находится коронка зуба) до наименьшего (когда на другой стороне располагается паз). Частота таких пульсаций индукции определяется числом зубцов и частотой вращения, т.е. зубцовой частотой, Гц:

$$f_z = nZ/60.$$

Вызванная этими пульсациями ЭДС создает в тонком поверхностном слое головок зубцов и полюсных наконечников вихревые токи, потери от которых и называют поверхностными.

Таким образом, наличие зубцов на статоре определяет возникновение поверхностных потерь в роторе, и, наоборот, зубцы ротора вызывают поверхностные потери на статоре. Поверхностные потери возникают во всех машинах, имеющих зубчатую поверхность на одной или на двух сторонах воздушного зазора. Эти потери имеют место в статорах и роторах асинхронных машин и на поверхности полюсных наконечников синхронных машин и машин постоянного тока.

Для расчета $P_{\text{пов}}$ предварительно находят амплитуду пульсаций индукции в воздушном зазоре B_0 в зависимости от индукции B_δ и размерных соотношений зазора — отношения ширины раскрытия паза к зазору $b_{\text{ш}}/\delta$. Среднее значение удельных поверхностных потерь $P_{\text{пов}}$, т.е. отнесенных к единице площади поверхности магнитопровода статора или ротора, обращенной к воздушному зазору, Вт/м²,

$$p'_{\text{пов}1} = k_0 (Z_2 n / 10\,000)^{1.5} (10^3 B_0 t_{Z2})^2; \quad (6.6)$$

$$p'_{\text{пов}2} = k_0 (Z_1 n / 10\,000)^{1.5} (10^3 B_0 t_{Z1})^2, \quad (6.7)$$

где коэффициент k_0 определяет влияние на потери толщины листов магнитопровода, марки стали и способа обработки поверхности; Z_1 и Z_2 — числа зубцов статора и ротора; n — частота вращения ротора, об/мин; t_{Z1} и t_{Z2} — зубцовые деления статора и ротора, м.

Полные поверхностные потери $P_{\text{пов}}$, Вт, получают умножением $p'_{\text{пов}}$ на площадь всей рассматриваемой поверхности статора или ротора — головок зубцов или полюсных наконечников.

Пульсационные потери $P_{\text{пул}}$ возникают в машинах, имеющих зубцы и на роторе, и на статоре, например в асинхронных машинах. Они обусловлены пульсациями потока в зубцах, что приводит к появлению вихревых токов в стали зубцов. Частота пульсаций потока и индукции в зубцах статора происходит с зубцовой частотой ротора, а частота пульсаций в зубцах ротора — с зубцовой частотой статора. Амплитуда пульсаций $B_{\text{пул}}$ зависит от среднего значения индукции в зубцах и размерных соотношений зубцовых зон. Потери $P_{\text{пул}}$, Вт, определяют отдельно для зубцов статора и ротора по следующим формулам:

$$P_{\text{пул}1} = (0,09 \div 0,11) (Z_2 n / 1000)^2 B_{\text{пул}1}^2 m_{Z1}; \quad (6.8)$$

$$P_{\text{пул}2} = (0,09 \div 0,11) (Z_1 n / 1000)^2 B_{\text{пул}2}^2 m_{Z2}, \quad (6.9)$$

где Z_1 и Z_2 — числа пазов статора и ротора; $B_{\text{пул}1}$ и $B_{\text{пул}2}$ — амплитуда пульсаций индукции в зубцах статора и ротора, Тл; m_{Z1} и m_{Z2} — массы зубцов статора и ротора, кг.

Поверхностные и пульсационные потери возникают во всех машинах, имеющих пазы, открытые в воздушный зазор, хотя бы на одной из его поверхностей. При закрытых пазах в магнитопроводе, расположенном на противоположной им стороне зазора, поверхностные и пульсационные потери не возникают. Например, эти потери отсутствуют на поверхности и в зубцах статора асинхронного двигателя, если его ротор выполнен с закрытыми пазами.

Относительная величина $P_{\text{пов}}$ и $P_{\text{пул}}$ в общей сумме потерь резко возрастает в машинах с большим числом пазов, с большой частотой вращения, а также при увеличении ширины пилица паза и уменьшении воздушного зазора. Это объясняется тем, что в первом случае возрастает частота, а во втором — амплитуда пульсаций индукции в воздушном зазоре и в зубцах магнитопровода. В двухполюсных асинхронных двигателях чрезмерное уменьшение воздушного зазора приводит к сильному увеличению потерь $P_{\text{пов}}$ и $P_{\text{пул}}$, что может служить причиной возрастания суммарных потерь и уменьшения КПД двигателя.

Добавочные потери при нагрузке возникают как в проводниках обмоток, так и в стали на отдельных участках магнитопровода. Ток нагрузки создает потоки рассеяния, сцепленные с проводниками обмоток. В результате этого в проводниках наводятся вихревые токи, вызывающие добавочные потери, не учтенные ранее в расчете. В машинах постоянного тока увеличение потерь при нагрузке связано также с коммутационным процессом, при котором токи в секциях изменяют свое направление. Поля, созданные высшими гармониками МДС обмоток, и зубцовые гармоники поля с ростом нагрузки машины увеличивают поверхностные и пульсационные потери. В машинах постоянного тока увеличение добавочных потерь в стали с ростом нагрузки связано также с искажением магнитного поля под действием поперечной реакции якоря.

Расчет отдельных добавочных потерь при нагрузке производят обычно лишь для машин большой мощности. Для машин общего назначения эти потери учитывают приближенно. Согласно ГОСТ 11828-86 добавочные потери при нагрузке для асинхронных и синхронных машин и машин постоянного тока с компенсационной обмоткой при расчете берут равными 0,5 % потребляемой номинальной мощности, а для машин постоянного тока без компенсационной обмотки 1 %.

6.6. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Общее выражение для коэффициента полезного действия

$$\eta = P_2/P_1. \quad (6.10)$$

Для генераторов P_2 — активная мощность, отдаваемая в сеть; P_1 — механическая мощность, затрачиваемая на вращение вала генератора. Для двигателей P_2 — механическая мощность на валу и P_1 — активная электрическая мощность, потребляемая двигателем.

Расчет электрических машин обычно проводят, исходя из заданной мощности P_2 , поэтому для любых значений нагрузки КПД, %, удобнее рассчитывать по формуле

$$\eta = 100 \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P} \right) = 100 \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_1} \right), \quad (6.11)$$

где P_1 и P_2 — потребляемая мощность, Вт, и нагрузка, для которой определяется КПД; ΣP — сумма всех потерь в машине при данной нагрузке, Вт.

Современные электрические машины имеют высокий КПД. Так, КПД машин мощностью несколько тысяч и более киловатт достигает 95–98 %, мощностью несколько сот киловатт 88–92 %, мощностью около 10 кВт 83–88 %. Лишь КПД машин малой мощности, до нескольких десятков ватт, составляет 30–40 %.

КПД электрической машины изменяется с изменением ее нагрузки. При увеличении нагрузки от холостого хода до номинальной КПД сначала быстро увеличивается, достигает максимального значения, после чего несколько снижается. Для оценки нагрузки, при которой КПД будет наибольшим, разделим все виды потерь в машине на три группы: постоянные, не изменяющиеся от нагрузки потери, обозначим для номинального режима P_1 , потери, пропорциональные току, P_2 , потери, пропорциональные квадрату тока, P_3 . К первой группе отнесем все виды механических и вентиляционных потерь и потери в стали, ко второй — например, электрические потери в щеточном контакте, к третьей — электрические потери в обмотках.

Введем понятие коэффициента нагрузки, равного отношению нагрузки электрической машины к ее номинальной мощности:

$$k_{\text{наг}} = P_2/P_{2\text{ном}}. \quad (6.12)$$

При условии, что во время работы машины ее частота вращения, напряжение сети, ток возбуждения и $\cos\varphi$ остаются постоянными, можно записать

$$k_{\text{наг}} = P_2/P_{2\text{ном}} = I/I_{\text{ном}}. \quad (6.13)$$

Тогда КПД при любой нагрузке электрической машины с учетом принятых обозначений групп потерь

$$\eta = \frac{k_{\text{наг}} P_{2\text{ном}}}{k_{\text{наг}} P_{2\text{ном}} + P_1 + k_{\text{наг}} P_2 + k_{\text{наг}}^2 P_3}. \quad (6.14)$$

Для определения условия, при котором КПД будет максимальным, приравняем к нулю производную этой функции:

$$\frac{d\eta}{dk_{\text{наг}}} = \frac{(P_1 - k_{\text{наг}}^2 P_3) P_{2\text{ном}}}{(k_{\text{наг}} P_{2\text{ном}} + P_1 + k_{\text{наг}} P_2 + k_{\text{наг}}^2 P_3)^2} = 0. \quad (6.15)$$

Таким образом, наибольший КПД электрическая машина будет иметь при такой нагрузке, при которой потери, зависящие от квадрата тока ($k_{\text{наг}}^2 P_3$), будут равны потерям, не зависящим от нагрузки, P_1 . С известным приближением это условие сводится к условию равенства электрических потерь в обмотках сумме механических, вентиляционных и магнитных потерь в машине.

Электрические потери в машине данной мощности определяются в основном плотностью тока, потери в стали — уровнем индукций на участках магнитопровода. Рекомендации современных методик проектирования электрических машин по выбору электромагнитных нагрузок дают такое соотношение потерь в машине, что наибольшего значения

КПД достигает при $k_{\text{наг}} = 0,7 \div 0,8$. Это оправдано тем, что при дискретной шкале мощностей электрические машины, особенно двигатели, в большинстве случаев работают с нагрузкой, несколько меньшей, чем номинальная мощность [14].

Если в техническом задании предлагается спроектировать машину с наибольшим КПД в номинальном режиме, то выбор электромагнитных нагрузок должен быть проведен так, чтобы электрические потери в обмотках в номинальном режиме ($k_{\text{наг}} = 1$) были равны сумме потерь в стали, механических и вентиляционных. Для этого должна быть несколько увеличена индукция по сравнению с обычно рекомендуемыми значениями и уменьшена плотность тока в обмотках.

Контрольные вопросы

1. Покажите на чертежах, как распределяются потери по объему машин различных типов.
2. Какие потери в электрических машинах разных типов зависят от их нагрузки, частоты вращения, тока возбуждения?
3. Какие виды потерь относят к добавочным?
4. Чем определяются добавочные потери холостого хода?
5. Почему при нагрузке машины появляются добавочные потери? Как их учитывают при расчете?
6. Как определить, при какой нагрузке КПД машины достигнет максимального значения?

Глава седьмая

ТЕПЛОВОЙ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

7.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕПЛООТДАЧИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

В активных и конструктивных элементах электрических машин выделяются значительные потери, природа и характер которых определяются основными и добавочными (вторичными) процессами. Мощность тепловых потоков, выделяемых во внутренних объемах машины, такова, что для их отвода в окружающую среду создают специальные принудительные системы охлаждения.

Тепловая напряженность машины может быть оценена по мощности потерь, приходящейся на единицу наружной поверхности машины. Однако полная тепловая схема машины представляет собой сложную многомерную тепловую систему. Температурные поля, в общем случае, изменяются по каждой из трех пространственных координат и не остаются постоянными с течением времени.

Для описания температурного поля машины обычно используют уравнение теплового состояния в общем виде

$$\vartheta = \vartheta(x, y, z, t), \quad (7.1)$$

где ϑ - температура точки тела в заданный момент; x, y, z -- пространственные координаты; t - время.

Тепловая энергия, выделяемая на элементах машин при ее работе, может вызывать недопустимое повышение температуры активных и конструктивных элементов машины, снижение электрической и механической прочности изоляции обмоток, уменьшение времени безотказной работы машины. Поэтому определение тепловых потоков, расчет изменения температуры в пространстве внутреннего объема и на поверхностях охлаждения машины являются важными разделами проектирования электрической машины. На основе этого расчета оценивается тепловое состояние машины, выбираются такие тепловые и вентиляционные схемы и способы ее охлаждения, при которых превышение температуры частей электрической машины не превосходит пределов допускаемых значений, установленных ГОСТ 183-74 (табл. 7.1).

Температура частей электрической машины зависит от температуры охлаждающей среды. В связи с неизбежными колебаниями температуры охлаждающей среды принято тепловую напряженность частей электрической машины характеризовать превышением их температуры над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{\text{охл}}, \quad (7.2)$$

где ϑ -- температура рассматриваемой части электрической машины; $\vartheta_{\text{охл}}$ - температура охлаждающей среды.

Номинальные данные электрической машины (мощность, напряжение, ток, частота вращения, коэффициент мощности, КПД и др.) обычно относятся к работе машины на высоте до 1000 м над уровнем моря при температуре окружающей среды до $+40^\circ\text{C}$ и охлаждающей воды до $+30^\circ\text{C}$, но не выше $+33^\circ\text{C}$, если в стандартах или технических условиях на проектируемую машину не указаны другие требования.

При длительной работе электрической машины влияние на тепловой режим и нагрев ее отдельных частей оказывают изменения напряжения сети, частоты, нагрузки и другие факторы.

Согласно ГОСТ 183-74 на общие технические требования к электрическим машинам установлены восемь номинальных режимов работы, из которых наиболее часто встречаются следующие: 1) продолжительный (условное обозначение S1); 2) кратковременный (S2) с длительностью рабочего периода 10, 30, 60 и 90 мин; 3) повторно-кратковременный (S3) с относительной продолжительностью включения ПВ-15, 25, 40 и 60% длительности одного цикла работы, равного 10 мин, 4) перемежающийся с чередованием неизменной номинальной нагрузки и

Таблица 7.1. Предельно допустимые превышения температуры частей электри и высоте над уровнем моря не более 1000 м (по ГОСТ 183-74)

Части электрических машин № п/п.		Изоляционный				
		А		Е		
		Предельно допустимые				
мето- дом термо- метра	мето- дом соп- ротив- ления	методом темпера- турных индика- торов, уложен- ных в паз	мето- дом тер- мом- метра	мето- дом сопро- тивле- ния		
1	Обмотки переменного тока машин мощностью 5000 кВт·А и выше или с длиной сердечника 1 м и более	-	60	60	-	70
2	Обмотки: а) обмотки переменного тока машин мощностью менее 5000 кВт·А с длиной сердечника менее 1 м б) обмотки возбуждения машин постоянного и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме указанных в пп. 3, 4 и 5 настоящей таблицы в) якорные обмотки, соединенные с коллектором					
		50	60	-	65	75
3	Обмотки возбуждения неявно-полюсных машин с возбуждением постоянным током	-	-	-	-	-
4	Однорядные обмотки возбуждения с оголенными поверхностями	65	65	-	80	80
5	Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев, и компенсационные обмотки	60	60	-	75	75
6	Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	60	-	-	75	-
7	Неизолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	Превышение температуры этих частей изоляционных или других смежных				
8	Сердечники и другие стальные части, не соприкасающиеся с изолированными обмотками					

ческих машин при температуре газообразной охлаждающей среды +40 °С

материал классов (по ГОСТ 8865-87)

В			С			Н			
превышения температуры, °С, при измерении									
методом темпера- турных индикато- ров, уложен- ных в паз	мето- дом термо- метра	мето- дом сопро- тивле- ния	методом темпера- турных индика- торов, уложен- ных в паз	мето- дом термо- метра	мето- дом сопро- тивле- ния	методом темпера- турных индика- торов, уложен- ных в паз	мето- дом термо- метра	мето- дом соп- ротив- ления	мето- дом темпе- ратур- ных ин- дикато- ров, уло- женных в паз
70	—	80	80	—	100	100		125	125
—	70	80	—	85	100	—	105	125	—
—	—	90	—	—	110	—		135	—
—	90	90	—	110	110	—	135	135	—
—	80	80	—	100	110	—	125	125	—
—	80	—	—	100	—	—	125		—

тей не должно достигать значений, которые создавали бы опасность повреждения материалов самих элементов и соседних частей

Продолжение табл. 7.1

№ п/п.	Части электрических машин	Изоляционный				
		А		Е		
		Предельно допустимые				
		мето- дом тер- мо- метра	мето- дом соп- ротив- ления	методом темпера- турных индикато- ров, уло- женных в паз	мето- дом тер- мо- мет- ра	мето- дом сопро- тивле- ния
9	Средечники и другие стальные части, соприкасающиеся с изолированными обмотками	60	—	60	75	
10	Коллекторы и контактные кольца не- защищенные и защищенные	60	—	—	70	—

Примечания: 1. Для стержневых обмоток ротора асинхронных машин допу-
2. Превышения температуры, указанные в п. 9, не должны превосходить допускае-

холостого хода (S6) без выключения машины с продолжительностью нагрузки ПН-15, 25, 40 и 60 % длительности одного цикла работы, равно-
го 10 мин.

Предельная допускаемая температура для какой-либо части электрической машины определяется как сумма допускаемого превышения температуры, взятой из табл. 7.1, и предельной допускаемой температуры охлаждающей среды +40 °С, принятой для электрических машин общего назначения.

Предельная допускаемая температура подшипников не должна превышать следующих значений: для подшипников скольжения 80 °С (температура масла не должна быть при этом выше 65 °С), для подшипников качения 100 °С.

Измерение температуры отдельных частей электрической машины при тепловых испытаниях осуществляют методами термометра, сопров-
тивления (только для обмоток) и температурных индикаторов.

При измерениях методом термометра согласно ГОСТ 11828-86 тем-
пература фиксируется термометром, прикладываемым к доступным
местам.

Для определения средней температуры обмоток, изготовленных из
меди, используют следующую формулу:

$$\Delta \vartheta = \frac{r_{\vartheta}}{r_x} (235 + \vartheta_x) + \vartheta_x - \vartheta_{охл}, \quad (7.3)$$

материал классов (по ГОСТ 8865-87)									
В			С			Н			
превышения температуры, °С, при измерении									
методом термоиндикаторов, уложенных в паз	методом термоиндикаторов, уложенных в паз	методом термоиндикаторов, уложенных в паз	методом термоиндикаторов, уложенных в паз	методом термоиндикаторов, уложенных в паз	методом термоиндикаторов, уложенных в паз	методом термоиндикаторов, уложенных в паз	методом термоиндикаторов, уложенных в паз	методом термоиндикаторов, уложенных в паз	методом термоиндикаторов, уложенных в паз
75	80	—	80	100	—	100	125	—	125
—	80	—	—	90	—	—	100	—	—

скается по согласованию с заказчиком иметь превышения температуры по п. 4. мые значения для соприкасающихся обмоток.

где r_{θ} — сопротивление обмотки в нагретом состоянии, Ом; r_x — сопротивление обмотки в холодном состоянии, Ом; θ_x — температура обмотки в холодном состоянии, °С.

Для обмоток, изготовленных из алюминия, вместо числа 235 следует подставить число 245.

Согласно ГОСТ 20459-87 обозначения способов охлаждения электрических машин, принятые в технической документации всех видов, состоят из латинских букв IC — первых букв английских слов International Cooling и следующих за ними буквы, характеризующей вид хладагента (А — воздух, Н — водород, N — азот, С — диоксид углерода, Fг — фреон, W — вода, U — масло, Kг — керосин) и двух цифр: первая условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая — способ перемещения хладагента. Условное обозначение устройства цепи циркуляции содержит 10 цифр (от 0 до 9): 0 — свободная циркуляция наружного воздуха; 1 — 3 — охлаждение при помощи проводящей (1), отводящей (2) или обеих труб (3); 4 — охлаждение наружной поверхности с использованием окружающей среды; 5, 6 — охлаждение окружающей средой при помощи встроенного (5) или пристроенного (6) теплообменника; 7, 8 — охлаждение при помощи встроенного (7) или пристроенного (8) охладителя; 9 — охлаждение при помощи охладителя, установленного отдельно от машины. Способы перемещения хладагента обозначаются второй цифрой: 0 — свободная конвекция; 1 — самовентилиция; 2 и 3 — перемещение хладагента встроенным или при-

строенным устройством, установленным непосредственно на валу машины (3) или связанным с валом через зубчатую или ременную передачу (2); 5 и 6 — то же при независимом устройстве; 7 — перемещение хладагента осуществляется отдельным устройством.

Если в машинах применяют двухконтурные системы охлаждения, то способы охлаждения обозначают, начиная с цепи более низкой температуры. Например, закрытая машина с водородным охлаждением и встроенным водяным охладителем, циркуляция воды в охладителе которой осуществляется отдельным и независимым от охлаждаемой машины насосом или от водопроводной сети, имеет обозначение IC37H71. Закрытая машина, которая имеет обмотку статора с непосредственным водяным охлаждением и обмотку ротора, охлаждаемую водородом, и циркуляция воды в обмотке статора которой осуществляется отдельным насосом, обозначается так: ICW87 — обмотка статора, H71 — обмотка ротора.

Самой простой схемой охлаждения, которая применяется преимущественно в машинах мощностью до 1 кВт, является схема с естественной вентиляцией без применения особых средств для повышения интенсивности охлаждения.

Большинство электрических машин общего назначения, за исключением турбо- и гидрогенераторов, а также синхронных компенсаторов охлаждаются воздухом и имеют принудительную схему вентиляции. В случае принудительной вентиляции цепь охлаждения машины может быть: разомкнутой — воздух поступает из окружающей среды, проходит каналы тракта охлаждения машины и выбрасывается снова в окружающую среду;

замкнутой — поток охлаждающего воздуха не связан с окружающей средой, а циркулирует по замкнутому контуру, включающему в себя и внутренний объем закрытой машины. При замкнутой вентиляции охлаждающий воздух отдает свою теплоту либо воде в специальном газоохладителе, либо корпусу машины через его внутреннюю поверхность, как это осуществляется, например, в асинхронных двигателях закрытого исполнения, обдуваемых наружным вентилятором.

В зависимости от направления движения воздуха (газа) внутри машины различают аксиальную, аксиально-радиальную и радиальную схемы вентиляции.

Если электрическая машина имеет схему самовентиляции, то напор в вентиляционной системе создается вентилятором, установленным на валу машины. Эта схема вентиляции подразделяется на два класса: нагнетательную и вытяжную. При нагнетательной схеме вентиляции охлажденный газ под воздействием избыточного давления, создаваемого нагнетателем, поступает в вентиляционные каналы активной зоны машины. При вытяжной схеме вентиляции охлаждающий газ поступает в вентиляционные каналы машины под действием разрежения, создаваемого вентилятором.

Вытяжная вентиляция обладает тем преимуществом, что газ поступает в машину без предварительного его подогрева вентилятором, что несколько снижает превышение температуры обмоток.

В практике электромашиностроения применяют как нагнетательные, так и вытяжные схемы вентиляции, которые по числу струй могут быть одноструйными и многоструйными. При многоструйной схеме вентиляции каналы каждой струи имеют независимые выходы подогретого воздуха в сборную зону перед нагнетателем.

Схему принудительной вентиляции с помощью независимого вентилятора применяют в машинах с широким диапазоном регулирования частоты вращения, когда система самовентиляции при малых частотах вращения ротора не является эффективной. По этой схеме выполняют отдельные модификации асинхронных двигателей серии 4А и машин постоянного тока серии 2П.

По способу отвода тепла от тепловыделяющих элементов электрических машин различают схемы косвенного и непосредственного охлаждения: в первом случае отвод тепла осуществляется с открытых поверхностей активных частей машины, во втором хладагент по специальным каналам подводится к проводникам обмоток машины, отбирая тепло непосредственно от обмоток.

Все электрические машины общего назначения выполняются по системе косвенного воздушного охлаждения.

Особенности конструктивного исполнения отдельных типов машин с косвенным воздушным охлаждением определили и их схему вентиляции: крупные машины постоянного тока и синхронные двигатели выполняются преимущественно с радиальной схемой вентиляции. Асинхронные машины большой мощности имеют радиальную, аксиальную и аксиально-радиальную схемы.

С ростом единичной мощности электрических машин возрастают удельные потери в объеме машины, поэтому воздушные системы охлаждения становятся неэффективными и для охлаждения турбо- и гидрогенераторов и синхронных компенсаторов применяют схемы косвенного охлаждения водородом совместно со схемами непосредственного жидкостного охлаждения. В качестве хладагента в этих случаях используют воду, которая обеспечивает самую высокую по сравнению с другими жидкостями эффективность охлаждения. Схема непосредственного водяного охлаждения обмоток статора и ротора находит применение в конструкциях мощных турбо- и гидрогенераторов.

Система непосредственного водяного охлаждения обычно сочетается с системой косвенного газового охлаждения активных частей машины [27].

7.2. ТЕПЛООБМЕН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Теплообмен в электрических машинах происходит путем теплопроводности, конвективного теплообмена и излучения.

Количество тепла Q , передаваемое за единицу времени через произвольную изотермическую поверхность S , прямо пропорционально температурному градиенту $\text{grad} \Delta \vartheta$ в направлении теплового потока:

$$q = -\lambda \text{grad} \Delta \vartheta, \quad (7.4)$$

где $q = Q/S$ — плотность теплового потока, Вт/м²; λ — теплопроводность материала тела; знак минус показывает, что тепловой поток распространяется в направлении уменьшения температуры, т.е. от точки тела с большей температурой к точке, имеющей меньшую температуру.

При одномерном распространении тепла, например, в направлении оси x имеем

$$\text{grad} \Delta \vartheta = d(\Delta \vartheta)/dx. \quad (7.5)$$

Теплопроводность λ характеризует способность вещества проводить тепло, определяется физическим свойством вещества и зависит от его состава, температуры и давления (для газообразных веществ). Наиболее достоверные значения теплопроводности получают экспериментальным путем.

В табл. 7.2 приведены значения теплопроводности различных материалов, применяемых в электромашиностроении.

Используя законы Фурье и сохранения энергии, можно привести уравнение теплового состояния (7.1) к дифференциальному уравнению теплопроводности, которое связывает временные и пространственные изменения температуры рассматриваемого элемента машины:

$$\rho c \frac{\partial (\Delta \vartheta)}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} \Delta \vartheta) + p, \quad (7.6)$$

где ρ — плотность окружающей среды, кг/м³; c — удельная теплоемкость элемента электрической машины, Дж/(кг · °С); p — мощность внутренних источников тепла, представляющая собой количество тепла, выделяемое в единице объема элемента машины за единицу времени.

Уравнение (7.6) можно использовать для анализа нагрева тела в стационарных и нестационарных режимах. Ниже рассмотрен пример нагрева однородного тела.

Теплообмен между поверхностью твердого тела и жидкой (газообразной) средой, конвективный теплообмен, описывается экспериментальным законом Ньютона -Рихмана, связывающим плотность теплового потока на поверхности q с температурами поверхности ϑ_{Π} и среды $\vartheta_{\text{охл}}$:

$$q = Q/S = a(\vartheta_{\Pi} - \vartheta_{\text{охл}}) = a\Delta \vartheta. \quad (7.7)$$

Таблица 7.2. Значения теплопроводности материалов

Материал	Вт/(м · °С)
Медь	380–395
Алюминий	198–220
Серебро	420
Сталь листовая электротехническая марок:	
1211, 1212, 1213	35–37
1311, 1411, 1412, 1413	19–24
1511, 1512, 1513	15–18
Сталь листовая электротехническая, шихтованная поперек пакетов:	
лист 0,5 мм, покрытие лаком	3,1
сталь 1521 0,35 мм, пропитка компаундом ЭК-1М	1,9
Дюралюминий	128
Сплавы алюминия (АК3, АК4, АКМ2-1)	147–159
Сталь (марки 08, 10, 20, 35, 45)	48–64
Стеклополотно	0,17–0,18
Стеклолакоткань	0,18–0,21
Слюда (флогонит)	0,51
Миканит ГФС	0,21–0,41
Пленка ПЭТФ:	
лумиррор	0,11
мелинекс	0,13
терфан	0,17
лавсан	0,21
Пленка полиимид	0,27
Пленка фторопласт-3/4	0,10/0,22
Пленка экскапон	0,20
Стеклослюдинит (ФС25К-40/ГС25КН)	0,12/0,24
Стеклотекстолит	0,33–0,43
Текстолит	0,17–0,22
Электронит	0,12–0,18
Изоляция пазовых обмоток якоря машин постоянного тока и роторов машин переменного тока:	
классы А, Е	0,10
классы В, Г, Н	0,16
То же статорных обмоток асинхронных машин:	
классы А, В, Е	0,10
классы В (компаундированная), Г, Н	0,16
Изоляция монолит-2 различного состава	0,19–0,32
Воздух при $p = 101$ кПа, $\vartheta = 40$ °С	0,0266

Соответственно перепад температуры между поверхностью и охлаждающей средой составит

$$\Delta\vartheta = q/\alpha, \quad (7.8)$$

где α — коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/(м² · °С), характеризующий интенсивность теплообмена.

Тепловое излучение происходит путем переноса тепла электромагнитным полем. В реальных случаях вид переноса тепла не рассматривают из-за малости его доли в общем процессе теплообмена.

7.3. НЕУСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ НАГРЕВАНИЯ ОДНОРОДНОГО ТЕЛА

Испытания электрических машин на нагрев показывают, что в области номинальных нагрузок машины общего назначения, имеющие сравнительно низкие удельные тепловые нагрузки, подчиняются закону нагревания идеального однородного тела. В данном случае с достаточной точностью можно считать, что тепло, рассеиваемое с поверхности машины S , пропорционально превышению температуры поверхности (7.4). При неизменных потерях Q , выделяемых в объеме машины, дифференциальное уравнение нагревания, выражающее баланс энергии за время dt , будет иметь вид

$$Q dt = cm d(\Delta\vartheta) + \alpha S \Delta\vartheta dt, \quad (7.9)$$

где c — эквивалентная удельная теплоемкость машины, Дж/(кг · °С); m — масса машины, кг.

В установившемся режиме, когда достигнуто конечное превышение температуры машины, все выделяемое тепло рассеивается в окружающую среду:

$$Q dt = \alpha S \Delta\vartheta_{\infty} dt, \quad (7.10)$$

или

$$Q = \alpha S \Delta\vartheta_{\infty}.$$

Общим решением уравнения (7.5) является

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 + (\Delta\vartheta_{\infty} - \Delta\vartheta_0)(1 - e^{-t/\tau_1}), \quad (7.11)$$

где $\Delta\vartheta_0$ — начальное превышение температуры машины; τ_1 — постоянная времени нагревания машины:

$$\tau_1 = cm/\alpha S.$$

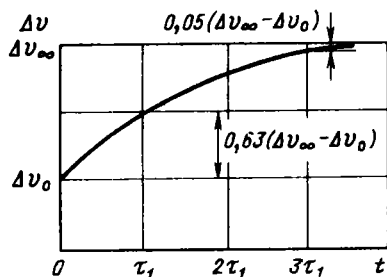


Рис. 7.1. Кривая нагревания машины

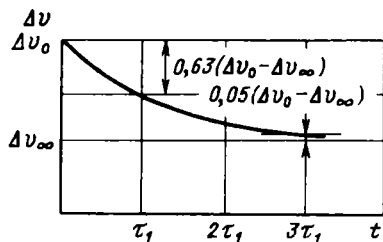


Рис. 7.2. Кривая охлаждения машины

При $\Delta\vartheta_\infty > \Delta\vartheta_0$ уравнение (7.11) отображает процесс нагревания, при $\Delta\vartheta_\infty < \Delta\vartheta_0$ — процесс охлаждения. Кривые нагревания и охлаждения машины представлены на рис. 7.1 и 7.2. Если в процессе нагревания $\Delta\vartheta_0 = 0$, то уравнение (7.11) принимает вид

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_\infty(1 - e^{-t/\tau_1}). \quad (7.12)$$

Если при охлаждении конечная температура машины сравняется с температурой окружающей среды, то $\Delta\vartheta_\infty = 0$ и уравнение охлаждения по (7.11) имеет вид

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 e^{-t/\tau_1}. \quad (7.13)$$

При экспоненциальном законе нарастания температуру можно считать установившейся (в пределах точности до 5%) через время $t = (3 \div 4)\tau_1$. Согласно (7.10) ее значение составит

$$\Delta\vartheta_\infty = Q/aS. \quad (7.14)$$

Таким образом, уравнение (7.6) позволяет рассчитать нагрев машины при любом неустановившемся тепловом режиме.

7.4. СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Основными источниками выделения тепла в электрической машине являются обмотка, элементы магнитопровода и конструктивные элементы, в которых возникают потери от перемагничивания. Тепло выделяется и в скользящем контакте. Механические потери, в том числе и вентиляционные, также увеличивают нагрев машины.

На пути движения тепловых потоков от источников тепла происходит перепад температуры в активных частях машины, в изоляции и между охлаждающими поверхностями и охлаждающей средой. В тепловом

расчете определяются все внутренние перепады и превышения температуры внешней поверхности охлаждаемых частей электрической машины над температурой охлаждающего воздуха.

В практических расчетах часто ограничиваются определением среднего превышения температуры обмоток, т.е. допускают, что температура обмоток в стали пакетов статора (ротора) — постоянна.

Для определения полного превышения температуры обмоток необходимо учесть подогрев охлаждающей среды, которая, поступая в машину, воспринимает тепло от нагретых частей.

Повышение технического уровня новых серий электрических машин ставит задачу поиска оптимальных вариантов, основанных на весьма точных методах электромагнитного и теплового расчетов разрабатываемой машины. Поэтому с развитием электромашиностроения совершенствуются и развиваются методы анализа и расчета тепловых процессов в машинах, более точно рассчитываются превышения температуры всех элементов машины.

Теплопроводность однородной стенки при отсутствии внутренних источников потерь. Количество тепла Q , проходящего через однородную стенку (изоляция, воздушный зазор, проводник, лист стали и т.д.), пропорционально перепаду температуры стенки $\Delta\vartheta_c$, площади стенки S_c в плоскости, перпендикулярной движению теплового потока, и теплопроводности λ_c материала стенки и обратно пропорционально толщине стенки b_c :

$$Q = \Delta\vartheta_c \frac{\lambda_c S_c}{b_c} . \quad (7.15)$$

Соответственно перепад установившейся температуры составит

$$\Delta\vartheta_{\text{п}} = Q \frac{b_c}{\lambda_c S_c} . \quad (7.16)$$

Введем понятие теплового сопротивления стенки R_{τ} , определяющего перепад температуры, аналогично электрическому сопротивлению R_{ϑ} , вызывающему соответствующее падение напряжения в цепи:

$$R_{\tau} = b/\lambda S; \quad R_{\vartheta} = \rho l/S. \quad (7.17)$$

В многослойной изоляционной стенке суммарный перепад температуры равен сумме перепадов в отдельных слоях. Соответственно суммарное тепловое сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных слоев изоляции:

$$R_{\text{из}} = R_{\text{из1}} + R_{\text{из2}} + \dots + R_{\text{изn}} ,$$

где $R_{изн} = b_{сн}/\lambda_{сн} S_{сн}$ — тепловое сопротивление n -го слоя стенки паза толщиной $b_{сн}$. Так как $S_{из1} = S_{из2} = \dots = S_{изn}$, то

$$b_{из}/\lambda_{экв} = b_{из1}/\lambda_{из1} + b_{из2}/\lambda_{из2} + \dots + b_{изn}/\lambda_{изn}. \quad (7.18)$$

Эквивалентная теплопроводность многослойной изоляционной стенки с общей толщиной $b_{из}$

$$\lambda_{экв} = \frac{b_{из}}{b_{из1}/\lambda_{из1} + b_{из2}/\lambda_{из2} + \dots + b_{изn}/\lambda_{изn}}. \quad (7.19)$$

Наличие воздушных прослоек в слоистой изоляции резко снижает результирующую теплопроводность изоляции. Для улучшения теплопроводности многослойной изоляции обмоток электрических машин и повышения ее электрической прочности предусматривают компаундирование обмоток специальными лаками и компаундами. Поэтому при выполнении тепловых расчетов электрических машин обычно используют эквивалентные значения теплопроводности, полученные экспериментальным путем для соответствующего класса изоляции (табл. 7.2).

Теплоотдача с поверхности. Отвод тепла охлаждающей средой с поверхности элементов машины определяется по формуле

$$Q = \alpha \Delta \vartheta_{п} S_{п}, \quad (7.20)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, зависящий от характера течения, скорости, физических свойств охлаждающей среды и от шероховатости поверхности охлаждения; $\Delta \vartheta_{п}$ — перепад температуры на поверхности охлаждения, °C; $S_{п}$ — площадь поверхности охлаждения, м².

Выражение (7.20) по аналогии с электрической цепью можно представить в следующем виде:

$$\Delta \vartheta_{п} = R_{п} Q_{п}, \quad (7.21)$$

где $R_{п} = 1/\alpha S_{п}$ — тепловое сопротивление поверхности нагретого тела.

Коэффициент теплоотдачи α определяют экспериментально на натуральных образцах или моделях. Результаты экспериментов обрабатывают и представляют в таком виде, чтобы формы уравнений для модели и реальной машины были одинаковыми. Эти уравнения совпадают, если вводятся критерии подобия. В тепловых расчетах электрических машин используются наиболее часто следующие критерии подобия.

1. Число Нуссельта

$$Nu = \alpha d/\lambda, \quad (7.22)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; d — характерный линейный размер;

λ -- теплопроводность охлаждающей среды, движущейся относительно рассматриваемой стенки.

Характерный линейный размер для каналов определяется как отношение площади сечения S_k канала к его периметру P_k . Этот параметр называется гидравлическим диаметром канала:

$$d_r = S_k / P_k. \quad (7.23)$$

Для канала круглого сечения гидравлический диаметр равен геометрическому диаметру сечения канала. При прямоугольном сечении канала со сторонами b и h гидравлический диаметр согласно (7.23) равен:

$$d_r = 2bh / (b + h); \quad (7.24)$$

для квадратного сечения при $b = h$

$$d = b;$$

для узких прямоугольных каналов при $h \gg b$

$$d \approx 2b.$$

Для открытых поверхностей охлаждения характерная длина принимается равной длине или высоте охлаждаемой поверхности.

2. Число Рейнольдса

$$Re = \nu d_r / \nu, \quad (7.25)$$

где ν -- скорость течения охлаждающей среды в канале, м/с; d_r -- гидравлический диаметр канала; ν -- коэффициент кинематической вязкости охлаждающей среды.

3. Число Прандтля

$$Pr = \nu / a, \quad (7.26)$$

где $a = \lambda / C_p \rho$ -- температуропроводность, м²/с; λ -- теплопроводность; C_p -- удельная теплоемкость; ρ -- плотность окружающей среды.

4. Число Тейлора

$$Ta = \omega r_1^{0.5} \delta^{1.5} / \nu, \quad (7.27)$$

где r_1 -- радиус ротора; δ -- воздушный зазор; ω -- угловая скорость вращения ротора.

Число Тейлора характеризует течение в цилиндрических коаксиальных каналах, одна из поверхностей которых вращается.

В электрических машинах с воздушным охлаждением на долю тепловых сопротивлений поверхностей охлаждения приходится от 50 до 80% общего теплового сопротивления электрической машины. Теплообмен в каналах и с поверхностями охлаждения машин обычно рассчитыва-

ется по формулам, полученным при опытных исследованиях конвективного теплообмена на моделях и натурных машинах. В табл. 7.3 приводятся некоторые формулы, которые используют в тепловых расчетах электрических машин.

Таблица 7.3. Теплообмен отдельных поверхностей охлаждения электрических машин

Участок охлаждения	Уравнение теплоотдачи
Теплообмен в зазоре между ротором и статором	$Nu = 0,082 Ta^{0,665}$
Теплообмен в зазоре машин постоянного тока и синхронных машин при $Re = 2,5 \cdot 10^3 \div 1,5 \cdot 10^4$; $Re = Re_{\omega} \sqrt{A^2 + (Re/Re_{\omega})^2}$; $A = 0,54 (\delta/r_1)^{0,32}$; $k_T = 1$ при вытяжной, $k_T = 1,7$ при нагнетательной вентиляции	$Nu = 0,015 Re^{0,8} k_T^{0,4} \times \left\{ \frac{1}{[1 + A^2 (Re_{\omega}/Re)^2]^{0,4}} + \frac{3,06 (\delta/r_1)^{0,7}}{[A^2 + (Re/Re_{\omega})^2]^{0,4}} \right\}$
Теплообмен обдуваемых ребристых станин при $Re_{эф} = \sqrt{\omega_{вх}^2 + (0,5 v_{вх})^2}$, где $\omega_{вх}$ — расходная скорость воздуха на входе в канал; $v_{вх}$ — окружная скорость вентилятора. Высота оси вращения $h = 70 \div 100$ мм	$Nu_{вх} = 0,627 Re_{эф}^{0,52};$ $Re_{эф} = (0,2 \div 3) \cdot 10^4$
Теплообмен внутренних поверхностей станины и щитов асинхронных машин при $h = 160 \div 250$ мм; D_a и D_i — внешний и внутренний диаметры сердечника статора; $Re_c = v D_a / 2 \nu$	$Nu_{с.вт} = 3 Re_c^{0,495} \ln \frac{1,3 D_i}{D_a D_i}$
Теплообмен на поверхности якоря и катушек возбуждения машин постоянного тока, где v_a — окружная скорость якоря	$\alpha = 1,4 (1 + 0,8 \sqrt{v_a})$
Теплообмен на поверхности коллектора и контактных колец, где $k = 0,7$ без обдува поверхности коллектора, $k = 1 \div 1,3$ при интенсивном обдуве поверхности коллектора; v_k — окружная скорость коллектора	$\alpha = 50 (1 + k \sqrt{v_k})$
Теплообмен на обдуваемых поверхностях станин и подшипниковых щитов, лакированных медных поверхностях (усредненные значения коэффициента теплоотдачи $k_0 = 0,1$ — для поверхностей ротора; для поверхностей лобовых частей и статорных обмоток $k_0 = 0,07 \div 0,05$)	$\alpha = 13,5 (1 + k_0 v_b)$

Участок охлаждения	Уравнение теплоотдачи
Теплопередача через ребренную стенку. E — коэффициент эффективности ребра, где l и δ_p — длина и толщина ребра; λ_p — теплопроводность материала ребра; α_2 — коэффициент теплоотдачи на ребренной поверхности	$E = \frac{\text{th}\left(\frac{1}{\delta_p} \sqrt{2 \frac{\alpha_2 \delta_p}{\lambda_p}}\right)}{\frac{1}{\delta_p} \sqrt{2 \frac{\alpha_2 \delta_p}{\lambda_p}}}$

При определении установившейся температуры рассматриваемой части машины необходимо учесть подогрев воздуха, обдувающего поверхность. Полный подогрев охлаждающего воздуха

$$\Delta \vartheta_v = Q_{\Pi} / (c_v V), \quad (7.28)$$

где $c_v = 1100 \text{ Дж}/(^{\circ}\text{С} \cdot \text{м}^3)$ — удельная теплоемкость воздуха; V — необходимое количество охлаждающего воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$.

Принимая линейный характер изменения нагрева воздуха вдоль пути его движения, считают, что среднее превышение его температуры над температурой входящего холодного воздуха $\vartheta_{\text{хол}}$ равно примерно $0,5 \Delta \vartheta_v$. В итоге средняя установившаяся температура обмотки электрической машины включает перепад температуры в изоляции $\Delta \vartheta_{\text{из}}$, превышение температуры охлаждаемой поверхности $\Delta \vartheta_{\Pi}$ и среднее превышение температуры воздуха $0,5 \Delta \vartheta_v$:

$$\vartheta = \Delta \vartheta_{\text{из}} + \Delta \vartheta_{\Pi} + 0,5 \Delta \vartheta_v + \vartheta_{\text{охл}}. \quad (7.29)$$

7.5. МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Точное решение задачи определения температурных полей электрических машин возможно с применением численных методов расчета трехмерных полей. Однако на практике тепловые расчеты машины выполняют чаще всего с помощью тепловых схем замещения. Этот метод можно рассматривать как приближенный для решения трехмерных задач. Он основан на аналогии тепловых и электрических потоков и тепловых и электрических сопротивлений. Эта аналогия вытекает из известных формул для элементарных участков тепловой и электрической цепи

$$\left. \begin{aligned} Q &= \lambda S \Delta \vartheta / \delta = \Delta \vartheta / R_T; \\ I &= S \Delta U / (\rho l) = \Delta U / R_z. \end{aligned} \right\} \quad (7.30)$$

При теплоотдаче с поверхности твердого тела уравнение (7.30) имеет вид

$$Q = \Delta\vartheta/R_a, \quad (7.31)$$

где $R_a = 1/\alpha S$; α — коэффициент теплоотдачи с поверхности охлаждения; S — площадь поверхности охлаждения.

Метод тепловых схем замещения может рассматриваться как метод конечных разностей, когда шаг сетки выбирают равным длине однородного участка тепловой схемы машины и он становится соизмеримым с размерами отдельных элементов машины.

Для составления тепловой схемы замещения всю тепловую систему машины с непрерывно распределенными тепловыми источниками и тепловыми параметрами заменяют эквивалентной электрической схемой (сеткой), составленной из внутренних сопротивлений между узловыми точками R_λ и поверхностных сопротивлений R_a . Точность решения увеличивается при увеличении числа узловых точек тепловой схемы. При этом необходимо помнить, что точность теплового расчета определяется не только количеством узловых точек, но в большей степени зависит от точности определения коэффициентов теплоотдачи с поверхностями нагрева, теплопроводности выбранных материалов и других факторов, вносящих неопределенность в исходные данные. Поэтому часто для определения тепловой напряженности отдельных участков или всей машины используют упрощенные тепловые схемы замещения с малым числом узловых точек.

Применение тепловых схем замещения дает возможность определять средние температуры частей электрической машины, принимаемых за однородные тела.

Рассмотрим построение тепловой схемы замещения на примере статора асинхронной машины. Тепловую схему статора можно разбить на три условно однородные в тепловом отношении части, являющиеся источником тепла и имеющие внутренние тепловые сопротивления: пазовую и две лобовые части обмотки статора с источниками тепловых потерь мощностью P_Π и P_Π и стальной сердечник с потерями P_c (рис. 7.3). В каждой части машины выделяются потери, мощность которых определяют тепловые потоки. Считая в общем случае, что условия охлаждения рассматриваемых частей машины различны, принимаем четыре пути рассеяния тепловых потоков: тепловой поток к стенкам зубцов сердечника $Q_{из}$ с перепадом температуры в тепловом сопротивлении изоляции паза $R_{из}$; тепловой поток к охлаждающему воздуху в радиальных вентиляционных каналах Q_k через тепловое сопротивление R_k ; тепловые потоки от пазовых частей обмотки с перепадом температуры в тепловом сопротивлении обмоток вдоль проводников $R'_{пр}$; тепловые потоки лобовых частей Q'_Π и Q''_Π с тепловыми сопротивлениями R'_Π ; тепловые потоки с поверхностями статора Q'_c , Q''_c с перепадом температуры в

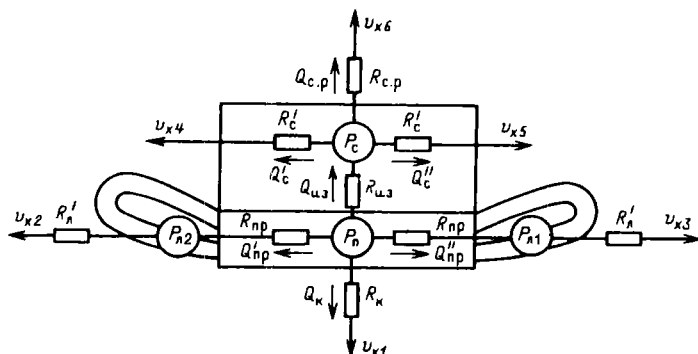


Рис. 7.3. Тепловая схема замещения статора

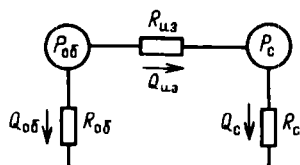


Рис. 7.4. Упрощенная тепловая схема замещения машины

тепловых сопротивлений R'_c и поток в радиальном направлении с наружной поверхности ярма статора и внутренней поверхности статора $Q'_{с.р}$ с перепадом температуры в тепловом сопротивлении $R_{с.р}$.

Для расчета тепловой напряженности электрической машины и определения средних значений превышений температуры отдельных частей принимают температуру охлаждающего воздуха у теплорассеивающих поверхностей одинаковой и равной средней температуре нагрева воздуха в объеме машины, в ряде случаев пренебрегают тепловым сопротивлением обмоток вдоль проводников. В этом случае тепловую схему машины сводят к упрощенной тепловой схеме замещения (рис. 7.4).

Расчет тепловых сопротивлений элементов схемы замещения выполняют по формулам, приведенным в табл. 7.4.

Приведенные в табл. 7.4 формулы тепловых сопротивлений являются усредненными и при тепловых расчетах могут дать превышения температуры с достаточно большими отклонениями от действительно наблюдаемых. Более точные значения тепловых сопротивлений получают в результате тепловых испытаний на моделях или натурных образцах конкретных типов машин. В соответствующих главах настоящей книги приводятся эти данные [27].

Таблица 7.4

№ п/п.	Элементы электрической машины	Формула теплового сопротивления
1	Электрическая изоляция пазовой части всыпной обмотки; P – периметр поверхности охлаждения паза; l – длина пакета статора; $l_{\text{ср}}$ – длина витка обмотки статора; $b_{\text{из}}$ – толщина изоляции; $\lambda_{\text{экр}}$ – теплопроводность изоляции в пазу; $b_{\text{п.ср}}$ – средняя ширина паза; $\lambda'_{\text{экр}}$ – эквивалентная теплопроводность внутренней изоляции катушки из круглого провода; $k_{\text{э}}$ учитывает увеличение сопротивления материала обмотки при увеличении температуры	$R_{\text{и}} = \frac{k_{\text{э}} 2l/l_{\text{ср}}}{Z\Pi l} \left(\frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{экр}}} + \frac{b_{\text{п.ср}}}{8\lambda'_{\text{экр}}} \right)$
2	Лобовые части обмотки статора: $l_{\text{л}}$ – длина лобовой части; $b_{\text{из.л}}$ – толщина изоляции лобовой части; $P_{\text{л}}$ – периметр секции обмотки в лобовой части; $h_{\text{л}}$ – высота паза	$R_{\text{л}} = \frac{k_{\text{э}} (2l_{\text{л}}/l_{\text{ср}})}{2Z\Pi l_{\text{л}}} \times \left(\frac{b_{\text{из.л}}}{\lambda_{\text{экр}}} + \frac{h_{\text{л}}}{12\lambda'_{\text{экр}}} \right)$
3	Электрическая изоляция обмотки якоря машины постоянного тока со всыпной обмоткой: обозначения согласно п. 1; r_1, r_2 – размеры паза	$R_{\text{из}} = \frac{2l/l_{\text{ср}}}{Z\Pi l} \left(\frac{r_1 + r_2}{8\lambda'_{\text{экр}}} + \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{экр}}} \right)$
4	Сердечник якоря машины постоянного тока: D – расчетный диаметр якоря; $\Sigma P_{\text{ст}}/P_{\text{м}}$ – отношение потерь стали к потерям в меди обмотки якоря; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника; $n_{\text{к}}$ – число и $d_{\text{к}}$ – диаметр аксиальных каналов	$R = \frac{2l/l_{\text{ср}} + \Sigma P_{\text{ст}}/P_{\text{м}}}{(\pi D + n_{\text{к}} d_{\text{к}}) \alpha l}$
5	Лобовые части обмотки якоря машины постоянного тока: обозначения согласно п. 1 и 2	$R_{\text{из}} = \frac{2l/l_{\text{ср}}}{2Z\Pi l_{\text{л}}} \left(\frac{h_{\text{л}}}{8\lambda'_{\text{экр}}} + \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{экр}}} \right)$
6	Внешняя поверхность обмоток параллельного возбуждения и добавочных полюсов: $k = 0,9$ (IP22), $k = 0,7$ (IP44), $k = 0,6$ (IP44, IC0141), $S = l_{\text{ср}} P$ – условная поверхность охлаждения катушки; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности катушки	$R = \frac{k}{2pS\alpha}$

№ п/п	Элементы электрической машины	Формула теплового сопротивления
7	Внешняя поверхность коллектора машины постоянного тока: S_K – условная поверхность охлаждения коллектора, a_K – коэффициент теплоотдачи с поверхности коллектора	$R = \frac{1}{S_K a_K}$
8	Воздушный зазор асинхронной машины: $\alpha'_\delta = \frac{Nu \lambda_\delta}{\delta}$; $Nu = \frac{0,212/Re}{1 - 3,81/fRe}$; $R = \frac{1}{\alpha'_\delta S_\delta}$ $f = \frac{1}{4(1,11 + 2lg \delta/c)^2}$, где $c = 0,08 \div 0,1$ мм; S_δ – теплопередающая поверхность воздушного зазора; $Re = \omega D \delta / 2\nu$	
9	Ярмо магнитопровода статора h_j ; S_j – высота и площадь наружной поверхности ярма статора	$R = \frac{h_j}{\lambda_c S_j}$
10	Пакет статора в поперечном направлении: a_K – коэффициент теплоотдачи в радиальных вентиляционных каналах; S_q – боковая теплоотдающая поверхность всех пакетов статора: $S_q = \pi(D_a - h_j)(n_K + 1)$, где n_K – число вентиляционных каналов; λ_q – теплопроводность пакета статора в поперечном направлении	$R = \frac{1}{a_{KT} S_q} + \frac{h_{CT}}{\lambda_q S_q}$
11	Внутренняя поверхность корпуса закрытой машины: $\alpha = 15 [1 + (0,05 \div 0,07 \nu)]$; ν – скорость обдува внутренней поверхности; $S_{внт}$ – полная внутренняя поверхность корпуса	$R = \frac{1}{\alpha S_{внт}}$
12	Внешняя поверхность корпуса статорной: S_{1K} S_{3K} – площади оребренной поверхности, боковой поверхности со стороны вентилятора и поверхности щита со стороны вала соответственно; коэффициенты теплоотдачи α_{1K} – α_{3K} определяются типом и исполнением машины	$R = \frac{1}{\alpha_{1K} S_{1K} + \alpha_{2K} S_{2K} + \alpha_{3K} S_{3K}}$

При вентиляционном расчете машины определяют количество воздуха, которое необходимо ежесекундно прогонять через машину, и давление (напор), обеспечивающее прохождение требуемого количества воздуха. Одновременно вентиляционный расчет проводится в целях определения рациональной схемы вентиляции, при которой количество охлаждающего воздуха, омывающего рассматриваемую поверхность, не должно быть чрезмерным, а должно соответствовать количеству снимаемого с поверхности тепла и обеспечивать заданный уровень превышения температуры обмоток машины. Воздушный поток обычно отводит все тепло машины, за исключением механических потерь в подшипниках и наружном вентиляторе.

Количество воздуха, необходимое для охлаждения машины при рациональной схеме вентиляции (когда превышения температуры воздуха на пути всех струй и каналов внутри машины одинаковы),

$$V_B = \Sigma P_B / (c_B \Delta \vartheta_B), \quad (7.32)$$

где ΣP_B — потери, отводимые воздухом, Вт; $c_B = 1100$ Дж/(°С·м³) — удельная теплоемкость воздуха; $\Delta \vartheta_B = \vartheta_r - \vartheta_{хол}$ — превышение температуры воздуха, °С; ϑ_r — температура горячего воздуха, °С; $\vartheta_{хол}$ — температура холодного воздуха, °С.

Значение подогрева воздуха $\Delta \vartheta_B$ может быть принято равным 20 °С для машин с изоляцией классов нагревостойкости А, Е, В, до 30 °С для изоляции классов нагревостойкости F и H, 25 °С для турбо- и гидрогенераторов.

При составлении расчетной схемы вентиляционная (гидравлическая) цепь системы охлаждения разбивается на большое число элементарных условно однородных участков, которые соединяются между собой как последовательно, так и параллельно.

Аэродинамическое сопротивление отдельного i -го участка системы определяют как отношение между массовым расходом V_i охлаждающей среды в заданном канале и потерями давления на рассматриваемом участке. Здесь также может быть проведена аналогия между гидравлическими и электрическими цепями.

Для определения необходимого давления вентилятора H требуется рассчитать постоянную Z , которую в дальнейшем будем называть аэродинамическим сопротивлением. Для отдельного участка

$$Z_i = H_i / V_i^2, \quad (7.33)$$

или

$$Z_i = \xi / (2 \rho S^2), \quad (7.34)$$

Таблица 7.5

Форма участка канала	Коэффициент сопротивления ξ
Вход в круглые отверстия каналов с выступающими краями	0,6
Вход в круглые отверстия каналов с прямоугольными краями	0,3
Вход в круглые отверстия каналов с закругленными краями или через проволочную сетку	0,125
Внезапное расширение канала сечением S_{min} до сечения S_{max}	$0,6 \left(1 - \frac{S_{min}}{S_{max}} \right)^2$
Внезапное сужение канала сечением S_{max} до сечения S_{min}	$0,35 \left(1 - \frac{S_{min}}{S_{max}} \right)^2$
Изгиб вентиляционного канала на угол α°	$\frac{0,7}{90} \alpha$
Лобовые части обмотки статора (перпендикулярно поверхности) при отношении ширины воздушного промежутка между секциями к шагу по середине пазов $b/b_{п.ср}$	$1,77 K$, где при $b/b_{п.ср} = 0,25 \div 0,4$ $K = 4,72 \div 1,7$

где ξ — коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ — плотность охлаждающей среды; S — сечение канала.

Расчет сопротивления Z_i производят с использованием опытных значений коэффициентов ξ (табл. 7.5).

Вентиляционный расчет на базе этих коэффициентов хотя и является приближенным, но дает возможность оценить требования, предъявляемые к вентиляционной системе, и позволяет правильно выбрать размеры и конфигурацию вентиляционных каналов.

Для круглых каналов значение коэффициента аэродинамического сопротивления от трения воздуха, $\text{Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$, можно рассчитать по формуле

$$\xi_{\text{тр}} = 0,6 \lambda \frac{l}{d}, \quad (7.35)$$

где λ — коэффициент трения о стенки канала; l и d — длина и диаметр канала.

Для расчета трения в аксиальных каналах электрических машин с достаточной для практики точностью можно принять $\lambda = 0,08$. В этом случае расчетная формула для коэффициента $\xi_{\text{тр}}$ принимает следующий вид:

$$\xi_{\text{тр}} = 0,05 \frac{l}{d} . \quad (7.36)$$

Если канал имеет прямоугольное сечение, то вместо d следует ввести эквивалентный диаметр

$$d_3 = 2ab/(a + b), \quad (7.37)$$

где a и b – размеры сторон прямоугольного канала.

Для каналов произвольного сечения можно принять в качестве эквивалентного размера диаметр круга, равного по площади рассматриваемому сечению.

Потери давления от трения воздуха в канале, Па,

$$H_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \nu^2, \quad (7.38)$$

где ν – скорость воздуха в канале, м/с.

Для вентиляционного расчета необходимо иметь чертежи машины и знать все размеры каналов вентиляционной системы, характеристик воздуховодов, коэффициенты аэродинамического сопротивления.

Любая сложная система вентиляции может рассматриваться как цепь последовательно и параллельно включенных вентиляционных каналов. При последовательном соединении n участков вентиляционной схемы расход V на всех участках постоянный, потеря давления равна $H_{ab} = \sum H_i$, поэтому аэродинамическое сопротивление от входа a до выхода b

$$Z_{ab} = \sum_{i=1}^n Z_i . \quad (7.39)$$

При параллельном соединении n участков потери давления на всех участках определяются разностью давлений в начале и в конце участка ab , а общий расход для всей цепи, состоящий из n параллельно соединенных каналов, равен:

$$V = \sqrt{\Delta H_{ab} / Z_{\Sigma}} . \quad (7.40)$$

Аэродинамическое сопротивление участка ab

$$Z_{ab} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{Z_i}} \right)^{-2} . \quad (7.41)$$

Вентиляционные схемы сложных систем охлаждения легко рассчитываются с помощью ЭВМ с использованием известных методов расчета электрических цепей.

В основу метода расчета вентиляционных и гидравлических цепей на ЭВМ положена система уравнений, составленная для всех узлов и контуров вентиляционной схемы по аналогии с первым и вторым законами Кирхгофа: $\Sigma V = 0$, т.е. во всех узлах алгебраическая сумма расходов равна нулю, и $\Sigma H_i + \Sigma \Delta H_i = 0$, т.е. сумма напоров вентиляторов и потерь давления всех ветвей для любого замкнутого контура равна нулю.

Конечным результатом вентиляционного или гидравлического расчета систем охлаждения является определение номинального напора вентилятора или нагнетательного устройства, обеспечивающего номинальный расход охлаждающей среды $V_{\text{ном}}$ при расчетном суммарном сопротивлении всей схемы охлаждения Z_{Σ} :

$$H_{\text{ном}} = Z_{\Sigma} V_{\text{ном}}^2. \quad (7.42)$$

В [27] приводятся эмпирические зависимости, которые позволяют приблизительно рассчитать параметры нагнетательных элементов и расход V , м³/с:

$$V_{\text{в}} = m(n_{\text{к}} l_{\text{к}} + 100) \frac{n}{1000} \left(\frac{D_{\text{вн}}}{100} \right)^2 \cdot 10^{-4}, \quad (7.43)$$

где при $2p = 2$ $m = 2,6$, а при $2p = 4, 6, 8, 10$ $m = 3,15$; $n_{\text{к}}$, $l_{\text{к}}$ — число и длина радиальных вентиляционных каналов (при их отсутствии $n_{\text{к}} l_{\text{к}} = 0$); $D_{\text{вн}}$ — внешний диаметр машины. Полученное по (7.43) значение V должно быть не менее рассчитанного по (7.32). Давление, Па,

$$H = 7,85 (n/1000)^2 (D_{\text{вн}}/100)^2. \quad (7.44)$$

Для двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 с наружным обдувом центробежным вентилятором необходимое количество воздуха определяют по формуле

$$V_{\text{в}} = \frac{\Sigma P m \sqrt{(n/1000) (D_{\text{вн}}/100)}}{1100 \Delta \vartheta_{\text{в}}}, \quad (7.45)$$

где $\Delta \vartheta_{\text{в}}$ — превышение температуры воздуха; $m \sqrt{(n/1000) (D_{\text{вн}}/100)}$ — коэффициент, учитывающий изменение условий теплоотдачи по длине корпуса. Значение m определяется по следующей таблице:

h , мм	$2p$	m
56–132	2	2,6
56–132	4; 6; 8	1,8
160–400	2	3,3
160–400	4; 6; 8; 10; 12	2,5

Превышение температуры $\Delta\vartheta_{\text{в}}$ определяется по формуле

$$\Delta\vartheta_{\text{в}} = \Sigma P' / (S_{\text{дв}} \alpha), \quad (7.46)$$

где $\Sigma P'$ — сумма всех потерь, выделяемых во внутреннем объеме машины при предельной допускаемой температуре; $S_{\text{дв}}$ — внутренняя теплопередающая поверхность двигателя; α — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности двигателя.

Расход охлаждающего воздуха двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 при параметрах вентилятора, соответствующих рекомендованным в § 7.5, $\text{м}^3/\text{с}$,

$$V_{\text{в}} = 0,6 \frac{n}{1000} \left(\frac{D_{\text{вн}}}{100} \right)^3 \cdot 10^{-2}. \quad (7.47)$$

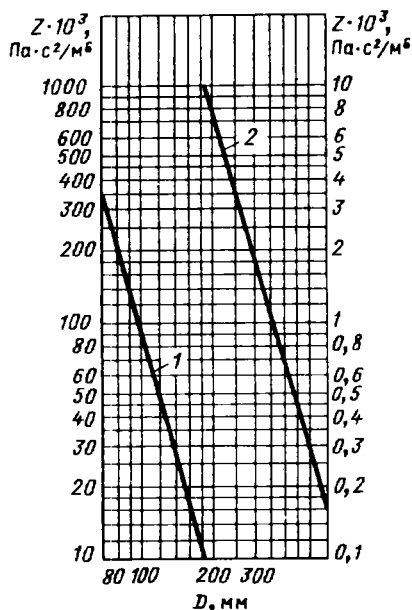


Рис. 7.5. Среднее значение аэродинамического сопротивления машины от диаметра якоря:

1 — якорь без аксиальных вентиляционных каналов; 2 — то же с аксиальными каналами

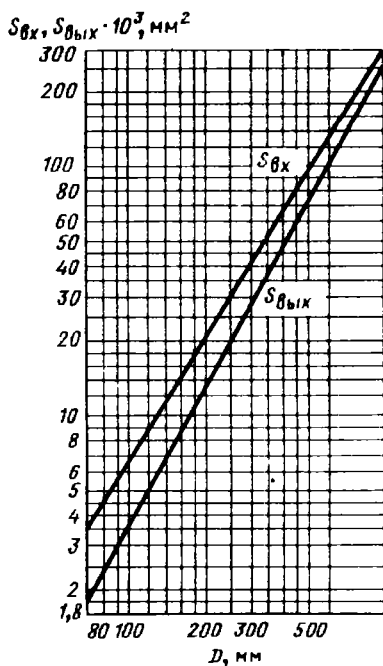


Рис. 7.6. Зависимость $S_{\text{вх}}$ и $S_{\text{вых}}$ от диаметра якоря

Напор вентилятора, Па,

$$H_v = 12,3(n/1000)^2 (D_{вн}/100)^2. \quad (7.48)$$

Для оценки вентиляции машины постоянного тока и других двигателей с аксиальной вентиляцией используют следующие зависимости, построенные на основе обобщения данных вентиляционных систем выпускаемых электрических машин.

С достаточной точностью сопротивление Z вентиляционной системы машины можно принять по рис. 7.5, а площади сечения входа $S_{вх}$ и выхода $S_{вых}$ каналов вентиляционного тракта машины — по рис. 7.6.

7.7. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯТОРОВ

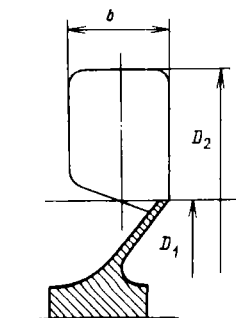
Встроенный вентилятор, укрепленный на валу электрической машины, должен создавать напор, достаточный для того, чтобы обеспечить необходимый расход охлаждающей среды в каналах вентиляционной системы машины. Вентиляторы проектируются с учетом особенностей конструктивного исполнения конкретного типа машины.

Ниже приводится упрощенный метод поверочного расчета встроенного вентилятора, основанный на данных серийных машин общего назначения. В таких машинах используют преимущественно центробежные вентиляторы с радиальными лопатками, рабочее колесо которых изменяет осевое направление потока на радиальное.

Внешний диаметр вентиляторного колеса выбирают в соответствии с типом вентиляционной системы и конструкции машины. При аксиальной вентиляции внешний диаметр рабочего колеса D_2 (рис. 7.7) выбирают максимально возможным.

По выбранному внешнему диаметру вентилятора определяют окружную скорость, м/с:

$$v_2 = (\pi D_2 n)/60. \quad (7.49)$$



Максимальное значение КПД вентилятора приблизительно соответствует режиму, когда номинальное давление вентилятора $H_{ном} = 0,75H_0$, где H_0 — давление, развиваемое вентилятором в режиме холостого хода, т. е. при закрытых отверстиях по внешнему диа-

Рис. 7.7. Колесо вентилятора

метру, когда расход воздуха равен нулю. Номинальное значение расхода приблизительно равно:

$$V_{\text{ном}} \approx V_{\text{max}}/2,$$

где V_{max} — расход вентилятора, работающего в режиме короткого замыкания, т.е. в открытом пространстве.

Из условия максимального КПД принимается, $\text{м}^3/\text{с}$,

$$V_{\text{max}} = 2 V_{\text{ном}}. \quad (7.50)$$

Сечение на выходной кромке вентилятора, м^2 ,

$$S_2 = \frac{V_{\text{max}} 60}{0,42 \pi D^2 n}, \quad (7.51)$$

где 0,42 — номинальный КПД радиального вентилятора.

Ширина колеса вентилятора равна:

$$b = S_2 / (0,92 \pi D_2), \quad (7.52)$$

где 0,92 — коэффициент, учитывающий наличие вентиляционных лопаток на поверхности вентиляционной решетки (поверхности S_2).

Внутренний диаметр колеса D_1 определяют из условия, что вентилятор работает при максимальном значении КПД, т.е. при $V' = 0,5 V_{\text{max}}$ и $H = 0,75 H_0$. Используя уравнения статического давления, развиваемого вентилятором, Па,

$$H_0 = \eta_a \rho (v_2^2 - v_1^2), \quad (7.53)$$

где $\eta_a = 0,6$ для радиальных лопаток; $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха, а также формулу вентиляционной системы машины, введем новое уравнение

$$\frac{2 V^2}{0,75 \eta_a \rho} = v_2^2 - v_1^2. \quad (7.54)$$

Отсюда окружная скорость на внутренней кромке вентилятора

$$v_1 = \sqrt{v_2^2 - \frac{2 V^2}{0,75 \rho \eta_a}}. \quad (7.55)$$

Внутренний диаметр колеса вентилятора, м, определим по скорости

$$D_1 = 60 v_1 / (\pi n). \quad (7.56)$$

Таблица 7.6

Высота оси вращения, мм	Число лопаток при	
	$2p=2$	$2p=4, 6, 8$
50 - 63	4	4
71 - 100	10	10
112 - 132	5	8
160 - 250		9
280 - 355	6	

Во встроенных вентиляторах отношение D_2/D_1 находится в пределах 1,2 - 1,5.

Число лопаток вентилятора принимают

$$N_{\text{л}} = (6 \div 10) \frac{D_2}{D_2 - D_1} . \quad (7.57)$$

Для уменьшения вентиляционного шума рекомендуется выбирать число лопаток вентилятора так, чтобы оно равнялось нечетному числу. При вытяжной вентиляции могут быть рекомендованы числа в зависимости от диаметра вентилятора: при $D_2 = 200$ мм $N_{\text{л}} = 13$, при $D_2 = 250$ мм, $N_{\text{л}} = 17$, при $D_2 = 300$ мм, $N_{\text{л}} = 23$, при $D_2 = 350$ мм, $N_{\text{л}} = 29$.

Для вентиляторов асинхронных двигателей серии 4А рекомендуется выбирать число лопаток согласно табл. 7.6.

Число лопаток вентиляторов машин постоянного тока выбирают ориентировочно:

$$N_{\text{л}} = D_2/20. \quad (7.58)$$

Значение $N_{\text{л}}$ округляют до ближайшего простого числа.

Для определения действительного расхода воздуха $V_{\text{в}}$ и давления $H_{\text{в}}$ строят совмещенные характеристики вентилятора и вентиляционного тракта машины. Характеристика вентилятора может быть выражена с достаточной точностью уравнением

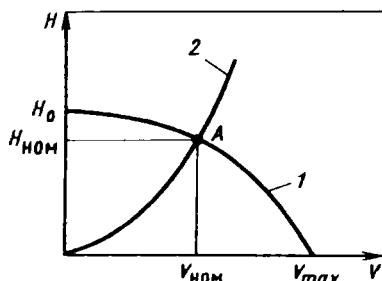
$$H = H_0 [1 - (V_{\text{в}} / V_{\text{max}})^2] . \quad (7.59)$$

Характеристика вентиляционного тракта согласно (7.50)

$$H = ZV^2 . \quad (7.60)$$

На рис. 7.8 представлены графики, построенные по 7.59 (кривая 1) и по (7.60) (кривая 2). Координата точки пересечения этих характеристик определяется путем решения уравнений

Рис. 7.8. Характеристики вентилятора



$$\left. \begin{aligned} H_{\text{ном}} &= H_0 Z V_{\text{max}}^2 / (H_0 + Z V_{\text{max}}^2); \\ V_{\text{ном}} &= V_{\text{max}} \sqrt{H_0 / (H_0 + Z V_{\text{max}}^2)}. \end{aligned} \right\} \quad (7.61)$$

Мощность, потребляемая вентилятором, Вт,

$$P_{\text{в}} = (H_{\text{ном}} V_{\text{ном}}) / \eta_3, \quad (7.62)$$

где η_3 — энергетический КПД вентилятора.

Энергетический КПД вентилятора может быть принят ориентировочно

$$\eta_3 \approx 0,19 \sin \pi \left(\frac{V_{\text{ном}}}{V_{\text{max}}} \right). \quad (7.63)$$

Более подробные вентиляционные расчеты отдельных видов исполнительных машин приводятся в гл. 8—10.

Контрольные вопросы

1. По какому тепловому параметру оценивается тепловая напряженность частей электрической машины?
2. Какими путями происходит теплообмен с окружающей средой в электрических машинах?
3. Как определяются коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности частей электрической машины?
4. Укажите методы построения тепловых схем замещения элементов электрической машины.
5. Каковы конечные результаты вентиляционного расчета электрической машины?
6. Приведите характеристику напора вентилятора от расхода охлаждающей среды.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ МАШИН

8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В асинхронных машинах преобразование энергии происходит при не-синхронном (асинхронном) вращении ротора и магнитного поля статора. В двигательном режиме разница частот вращения ротора и поля статора в большинстве случаев невелика и составляет лишь несколько процентов. Поэтому частоту вращения ротора оценивают не в абсолютных единицах (об/мин или об/с), а в относительных, вводя понятие скольжения:

$$s = (n_c - n)/n_c,$$

где n_c — частота вращения поля (синхронная частота вращения); n — частота вращения ротора.

Скольжение выражается либо в относительных единицах ($s = 0,02$; $0,025$ и т.п.), либо в процентах ($s = 2\%$; $2,5\%$ и т.п.).

Частота тока и ЭДС, наводимая в проводниках обмотки ротора, зависят от частоты тока и ЭДС обмотки статора и от скольжения:

$$f_2 = f_1 s; \quad E'_2 = E_1 s,$$

где E_1 — ЭДС обмотки статора; E'_2 — ЭДС обмотки ротора, приведенная к числу витков обмотки статора.

Теоретически асинхронная машина может работать в диапазоне изменения скольжения $s = -\infty \div +\infty$ (рис. 8.1), но не при $s = 0$, так как в этом случае $n = n_c$ и проводники обмотки ротора неподвижны относительно поля статора, ЭДС и ток в обмотке равны нулю и момент отсутствует. В зависимости от практически возможных скольжений различают несколько режимов работы асинхронных машин (рис. 8.1): генераторный режим при $s < 0$, двигательный при $0 < s < 1$, трансформаторный при $s = 1$ и тормозной при $s > 1$. В генераторном режиме ротор машины вращается в ту же сторону, что и поле статора, но с большей частотой. В двигательном направлении вращения поля статора и ротора сов-

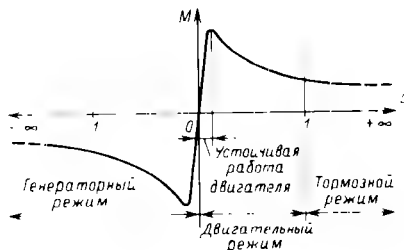


Рис. 8.1. Механическая характеристика асинхронной машины

падают, но ротор вращается медленнее поля статора: $n = n_c(1 - s)$. В трансформаторном ротор машины неподвижен и обмотки ротора и статора не перемещаются относительно друг друга. Асинхронная машина в таком режиме представляет собой как бы трансформатор и отличается от него расположением первичной и вторичной обмоток (обмотки статора и ротора) и наличием воздушного зазора в магнитопроводе. В тормозном режиме ротор вращается, но направление его вращения противоположно направлению поля статора и машина создает момент, противоположный моменту, действующему на вал. Подавляющее большинство асинхронных машин используется в качестве двигателей, и лишь очень небольшое количество — в генераторном и трансформаторном режимах.

Для оценки механической характеристики асинхронного двигателя моменты, развиваемые двигателем при различных скольжениях, обычно выражают не в абсолютных, а в относительных единицах, т.е. указывают кратность по отношению к номинальному моменту: $M_* = M/M_{ном}$. Зависимость $M_* = f(s)$ асинхронного двигателя (рис. 8.2) имеет несколько характерных точек, соответствующих пусковому $M_{п*}$, минимальному M_{min*} , максимальному M_{max*} и номинальному $M_{ном*}$ моментам.

Пусковой момент $M_{п*}$ характеризует начальный момент, развиваемый двигателем непосредственно при включении его в сеть при неподвижном роторе ($s = 1$). После трогания двигателя с места его момент несколько уменьшается по сравнению с пусковым (рис. 8.2). Обычно M_{min*} на 10–15% меньше $M_{п*}$. Большинство двигателей проектируют так, чтобы их M_{min} был больше $M_{ном}$, так как они могут быть пущены лишь при условии, что момент сопротивления, приложенный к валу, будет меньше, чем M_{min} .

Максимальный момент M_{max*} характеризует перегрузочную способность двигателя. Если момент сопротивления превышает M_{max*} , двигатель останавливается. Поэтому M_{max*} называют также критическим, а скольжение, при котором момент достигает максимума, — критическим скольжением $s_{кр}$. Обычно $s_{кр}$ не превышает 0,1–0,15; в двигателях с повышенным скольжением, в крановых, металлургических и т.п. $s_{кр}$ может быть значительно больше.

В диапазоне $0 < s < s_{кр}$ характеристика $M = f(s)$ имеет устойчивый характер. Она является рабочей частью механической характеристики двигателя. При скольжениях $s > s_{кр}$ двигатель в нормальных условиях работать не может. Эта часть характеристики определяет пусковые свойства двигателя от момента пуска до выхода на рабочую часть характеристики.

Трансформаторный режим, т.е. режим, когда обмотка статора подключена к сети, а ротор неподвижен, называют также коротким замыканием двигателя. При $s = 1$ ток двигателя в несколько раз превышает номинальный, а охлаждение много хуже, чем при номинальном режи-

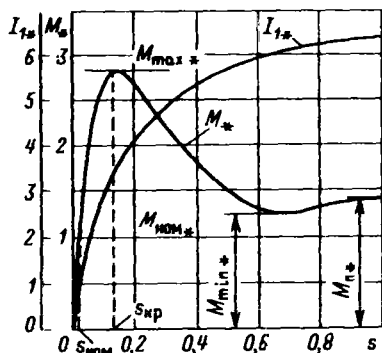


Рис. 8.2. Зависимость тока и момента асинхронного двигателя от скольжения

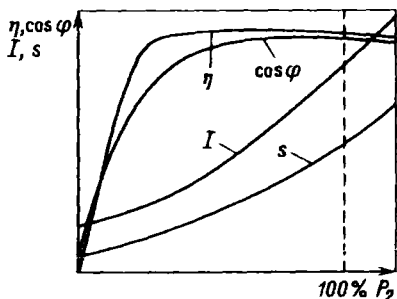


Рис. 8.3. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

ме. Поэтому в режиме короткого замыкания асинхронный двигатель, не рассчитанный для работы при скольжениях, близких к единице, может находиться лишь в течение нескольких секунд.

Режим короткого замыкания возникает при каждом пуске двигателя, однако в этом случае он кратковременен. Несколько пусков двигателя с короткозамкнутым ротором подряд или через короткие промежутки времени могут привести к превышению допустимой температуры его обмоток и к выходу двигателя из строя.

Для работы асинхронных машин со скольжениями, близкими к единице, в трансформаторном или тормозном режимах их рассчитывают с пониженными электромагнитными нагрузками. Примером использования асинхронных машин, номинальным режимом для которых является трансформаторный, могут служить индукционные регуляторы или фазовращатели [12].

Рабочие характеристики асинхронных двигателей (рис. 8.3) показывают, что наибольшего КПД правильно спроектированный двигатель достигает при нагрузке, на 15–20% меньше номинальной. Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них из-за стандартной дискретной шкалы мощностей работают с недогрузкой. Напомним, что наибольший КПД будет у двигателя при нагрузке, при которой постоянные не зависящие от тока потери (потери в стали, механические, вентиляционные) будут в сумме равны переменным, зависящим от тока, — электрическим потерям в обмотках двигателя (см. гл. 6). Это позволяет при проектировании направленным выбором плотности тока в обмотках и индукции на участках магнитопровода определить нагрузку, при которой КПД достигнет наибольшего значения.

Конструктивные исполнения асинхронных двигателей по способу монтажа соответствуют ГОСТ 2479-79. Наибольшее распространение полу-

чили группы исполнения IM2 — IM4 (см. гл. 1), т.е. двигатели со станиной на лапах или с разного вида фланцами на станине или на подшипниковом щите. Среди двигателей малой мощности встречаются группы исполнения IM5 — машины без подшипниковых щитов и IM9 — машины специального исполнения, которые часто применяют как встроенные в различные механизмы, в ручной электрофицированный инструмент и т.п. Асинхронные двигатели мощностью более 1000 кВт, особенно с малой частотой вращения, часто выполняют с выносными подшипниковыми стойками — группа исполнения IM7 или IM8.

По степени защиты от воздействия окружающей среды наиболее характерны для двигателей малой и средней мощности исполнения IP44 и IP54 со способом охлаждения IC0141. Двигатели средней мощности выпускают также со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01. Двигатели большой мощности на высокое напряжение часто имеют закрытое исполнение со встроенным воздушным или водяным охладителем, например с охлаждением по способу IC37A81 (см. гл. 7).

Сердечники статоров и роторов всех асинхронных двигателей общего назначения шихтуют из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. При длине менее 250—300 мм они выполняются без вентиляционных каналов. При большей длине сердечники подразделяют на пакеты длиной 40—50 мм каждый. Между пакетами устанавливают дистанционные распорки, при этом образуются радикальные вентиляционные каналы, служащие для прохода охлаждающего воздуха. Ширина каналов в большинстве машин выполняется равной 10 мм. В собранной машине радиальные каналы статора и ротора располагаются напротив друг друга.

Статоры машин общего назначения напряжением до 660 В, мощностью до 100 кВт имеют трапецидальные полужакрытые пазы с узким штилем (см. рис. 3.4), размерные соотношения которых (ширину верхней и нижней частей и высоту паза) выполняют такими, чтобы зубцы статора имели параллельные стенки. Это уменьшает МДС зубцов по сравнению с зубцами с неравномерной площадью поперечного сечения. Обмотку таких машин выполняют из круглого провода.

В статорах машин большей мощности обмотку выполняют из прямоугольного провода, причем при напряжении, не превышающем 660 В, — из подразделенных катушек. Пазы статора в таких машинах полуоткрытые (см. рис. 3.6, а), что позволяет избежать большой неравномерности индукции в воздушном зазоре. Обмотку укладывают в пазы, пропуская через суженный штиль паза каждую из полукатушек поочередно (см. гл. 3).

В статорах машин с номинальным напряжением 3 кВ и выше и машин специального исполнения независимо от напряжения выполняют обмотку из жестких, изолированных до укладки в пазы катушек. Поэтому пазы таких машин делают только открытыми (см. рис. 3.6, б).

Конструкция крепления сердечника статора в корпусе зависит от габаритов и мощности машины. В большинстве машин малой мощности

корпуса выполняют из алюминия, в некоторых конструкциях — заливкой алюминия на собранный сердечник статора. Подшипниковые щиты также алюминиевые. В машинах большей мощности и корпуса, и подшипниковые щиты чугунные. В машинах больших габаритов корпуса сварные из стальных листов, закрытые снаружи листовой сталью. Магнитопровод крепится к продольным ребрам корпуса.

Магнитопроводы роторов шихтуют из той же стали, что и статоров. В двигателях общего назначения с высотой оси вращения до 450 мм их насаживают непосредственно на вал, причем до высоты оси вращения 250 мм — на гладкий вал; в двигателях с большей высотой оси вращения крепят на валу с помощью шпонки. Сердечники роторов больших габаритов насаживают на втулку или на остов ротора.

В большинстве асинхронных двигателей вентиляторы устанавливают на валу ротора, в двигателях со степенью защиты IP23 — внутри корпуса, со степенью защиты IP44 и IP54 — вне корпуса и защищают кожухом.

Асинхронные двигатели подразделяют на два типа: с короткозамкнутыми (рис. 8.4) и фазными (рис. 8.5) роторами. По конструкции они отличаются между собой только роторами и отдельными элементами

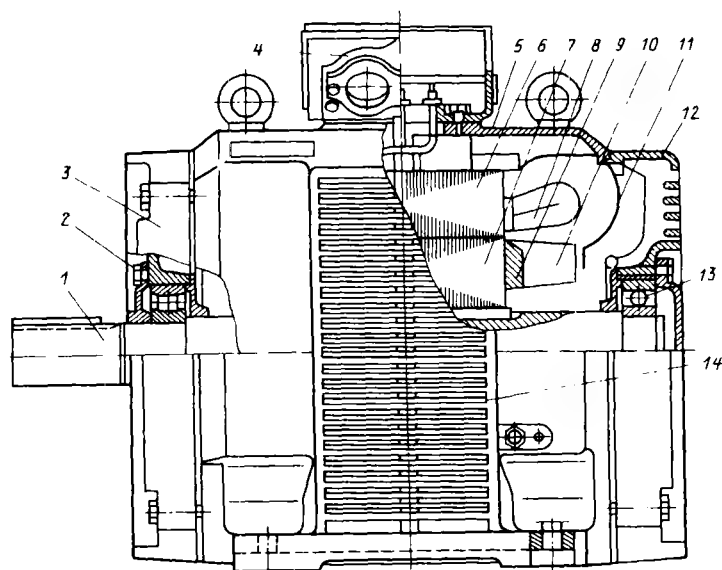


Рис. 8.4. Двигатель серии АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23, $h = 225$ мм:

1 — вал; 2, 13 — подшипники; 3, 12 — подшипниковые щиты; 4 — коробка выводов; 5 — корпус; 6 — сердечник статора; 7 — сердечник ротора; 8 — лобовые части обмотки статора; 9 — короткозамыкающие кольца обмотки ротора; 10 — вентиляционные лопасти ротора; 11 — диффузоры; 14 — жалюзи корпуса

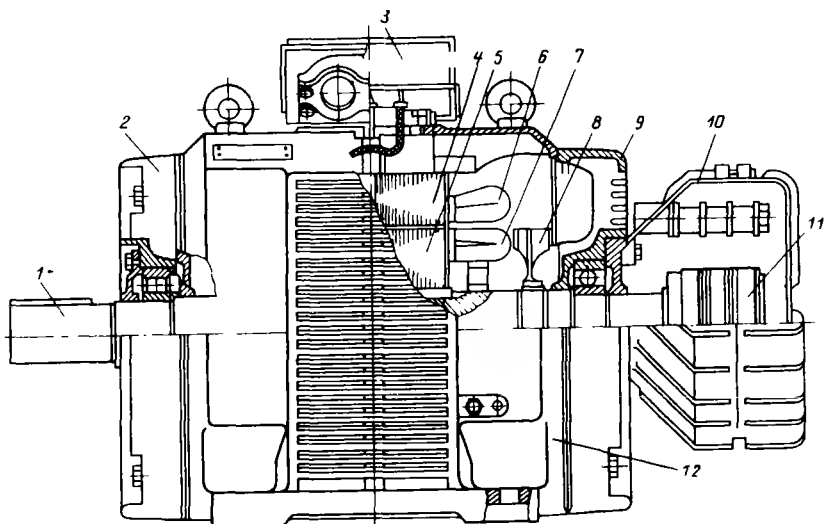


Рис. 8.5. Двигатель серии АИ с фазным ротором со степенью защиты IP23, $h = 225$ мм:

1 - вал; 2, 9 - подшипниковые щиты; 3 - коробка выводов; 4 - сердечник статора; 5 - сердечник ротора; 6 - лобовые части обмотки статора; 7 - лобовые части обмотки ротора; 8 - вентилятор; 10 - кожух контактных колец; 11 - контактные кольца; 12 - корпус

корпусов. В пазах фазных роторов располагают изолированную трехфазную обмотку, жестко соединенную в звезду или в треугольник. Обмотка имеет три вывода, которые соединены токопроводами с контактными кольцами. Прилегающие к контактным кольцам щетки электрически соединяют выводы обмотки ротора с пусковым реостатом, который позволяет увеличивать сопротивление роторной цепи во время пуска двигателя. Контактные кольца располагают либо внутри корпуса, либо вне его на выступающем конце вала. При такой конструкции кольца и весь щеточный аппарат закрывают кожухом из листовой стали.

При пуске двигателя между кольцами включают пусковые резисторы, что увеличивает активное сопротивление цепи ротора и, следовательно, пусковой момент двигателя и ограничивает ток при пуске и разгоне. По мере разгона группы резисторов пускового реостата поочередно замыкают, причем время замыкания очередной группы выбирают таким, чтобы до достижения номинальной частоты вращения во время всего пускового периода момент и ток двигателя изменялись в определенных пределах (рис. 8.6).

Включение резисторов в цепь ротора используют также для плавного регулирования частоты вращения. Однако эта возможность ограничена возникновением больших потерь в резисторах, по которым проходит

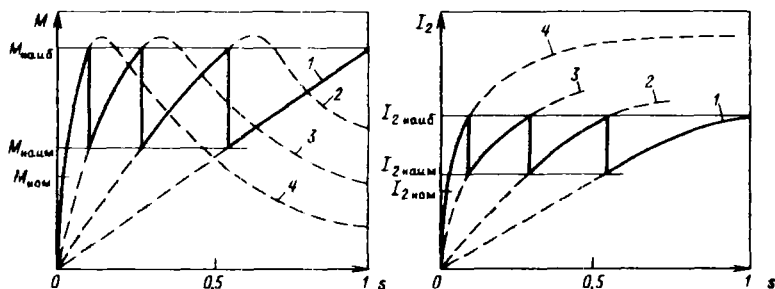


Рис. 8.6. Изменение тока и момента при реостатном пуске асинхронного двигателя с фазным ротором:

1–3 – характеристики при различных ступенях пускового реостата с последовательно убывающими значениями сопротивлений; 4 – естественные характеристики; $M_{\text{наиб}}$, $M_{\text{наим}}$ – наибольший и наименьший моменты, развиваемые двигателем в процессе реостатного пуска; $I_{2\text{наиб}}$, $I_{2\text{наим}}$ – наибольший и наименьший токи ротора во время разгона двигателя

фазный ток ротора. В ряде приводов, например в крановых, такой способ регулирования все же применяют, но в этом случае используют не пусковой, а регулировочный реостат, рассчитанный на длительную работу при больших токах.

Обмотки короткозамкнутых роторов не имеют изоляции. В двигателях общего назначения мощностью до 300 – 400 кВт они выполняются заливкой пазов алюминием или его сплавами, причем одновременно со стержнями обмотки отливают замыкающие кольца с вентиляционными лопатками (см. рис. 3.10). В ряде конструкций двигателей этой мощности и во всех двигателях большей мощности обмотку роторов изготовляют из вставных стержней, в подавляющем большинстве случаев – медных. К выступающим из пазов концам стержней припаивают или приваривают замыкающие кольца.

Технология изготовления роторов с короткозамкнутой обмоткой значительно проще, чем фазных. Кроме того, в связи с отсутствием изоляции, контактных колец, скользящих контактов и пусковых реостатов уменьшаются габариты и стоимость двигателей, повышается их надежность и упрощаются техническое обслуживание и эксплуатация. Поэтому большинство современных асинхронных двигателей выполняют с короткозамкнутыми роторами. Одним из недостатков асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами является невозможность включить в цепь ротора во время пуска реостат для увеличения пускового момента и снижения тока. При проектировании двигателей с короткозамкнутыми роторами направленным выбором параметров ограничивают пусковой ток до 6-7-кратного по сравнению с номинальным, а для повышения пусковых моментов используют эффект вытеснения тока в стержнях

обмотки ротора. Он заключается в неравномерном распределении плотности тока по поперечному сечению стержня. Под действием эффекта вытеснения плотность тока в ближайшей к дну паза части каждого стержня уменьшается, а в верхней возрастает. Неравномерность распределения плотности тока вызывает увеличение электрических потерь в обмотке, эквивалентное увеличению ее активного сопротивления, и пусковой момент двигателя возрастает.

Действие эффекта вытеснения тока проявляется в большей степени при большей частоте тока, поэтому в двигательном режиме наибольшая неравномерность распределения плотности тока по сечению стержня наблюдается при $s = 1$, когда $f_2 = f_1$. При этом же скольжении будет и наибольшее эквивалентное сопротивление обмотки ротора, вызывающее увеличение пускового момента. При разгоне двигателя частота тока в роторе уменьшается ($f_2 = f_1 s$) и соответственно уменьшается сопротивление обмотки. В режимах, близких к номинальному, частота тока в роторе мала, эффект вытеснения тока практически не проявляется и плотность тока одинакова по всему сечению стержней ротора.

Увеличение эквивалентного сопротивления под действием эффекта вытеснения тока проявляется в большей степени в стержнях, поперечное сечение которых имеет большую высоту или уменьшенную площадь верхней части по сравнению с нижней. Поэтому в роторах двигателей, предназначенных для работы с тяжелыми условиями пуска, делают глубокие прямоугольные пазы (глубокопазные роторы) или стержни обмотки выполняют фигурными. Обмотки роторов с фигурными пазами выполняют в большинстве двигателей заливкой алюминием или его сплавами. Это позволяет выполнять конфигурацию пазов с оптимальными размерными соотношениями стержней для достижения требуемого действия эффекта вытеснения тока.

Еще больший эффект увеличения сопротивления при пуске возникает в роторах с двойной беличьей клеткой, в пазах которой друг над другом располагают стержни двух обмоток. Верхние стержни образуют одну обмотку, нижние — другую. При пуске, когда эффект вытеснения тока проявляется в наибольшей степени, практически весь ток протекает по верхней клетке. Ее называют пусковой. При работе в номинальном режиме и с малыми скольжениями действие эффекта вытеснения тока очень мало и ток распределяется равномерно по обеим обмоткам пропорционально их активному сопротивлению. Обмотку, образованную нижними стержнями, называют рабочей.

Обмотки роторов с двойной беличьей клеткой выполняют как литыми, так и из вставных стержней. В литых обмотках обе клетки — и рабочую, и пусковую — и замыкающие кольца одновременно заливают одинаковым металлом. В роторах со вставными стержнями рабочую обмотку выполняют из медных, а пусковую — обычно из латунных стержней. В таких роторах замыкающие кольца обмоток отдельные, из того же материала, что и стержни. Латунь применяют для пусковых клеток, так

как она имеет большее удельное сопротивление, чем медь, и сопротивление обмотки ротора в пусковых режимах возрастает сильнее, чем при стержнях из одинакового материала. Кроме того, теплоемкость латуни выше, чем меди, поэтому нагрев латунных стержней за время пуска двигателя ниже, чем медных того же размера.

Двигатели с фигурными пазами или с двойной клеткой на роторе имеют более высокие пусковые характеристики, чем с грушевидными или полуовальными пазами, однако у них больше индуктивное сопротивление обмоток роторов. Это приводит к понижению максимальных моментов и ухудшению коэффициента мощности двигателей в номинальном режиме. Поэтому такие роторы выполняют лишь для двигателей, предназначенных для тяжелых условий пуска, для которых требования к пусковым характеристикам более важны, чем к другим энергетическим показателям.

8.2. ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А

Потребность народного хозяйства в асинхронных двигателях очень велика. Они являются основными двигателями в электроприводах практически всех промышленных предприятий. В СССР выпуск асинхронных двигателей превышает 10 млн. штук в год. Наиболее распространены двигатели на номинальное напряжение до 660 В, суммарная установленная мощность которых составляет около 300 млн. кВт.

В современном электромашиностроении асинхронные двигатели, как правило, выпускают сериями. В СССР впервые в мировой практике в 1946—1948 г. разработана первая единая государственная серия асинхронных машин общего назначения мощностью до 100 кВт — серия А (АО). Учитывая повышающиеся требования промышленности и используя достижения в области развития металлургии и производства изоляционных материалов, а также развитие теории проектирования и расчета серий машин с помощью ЭВМ, последовательно были разработаны и внедрены серии асинхронных двигателей: в 60-е годы — серия А2 (АО2) и в 70-е годы — серия 4А.

Двигатели серии 4А выпускались в 80-х годах в массовом количестве и в настоящее время эксплуатируются практически на всех промышленных предприятиях СССР. Серия охватывает диапазон мощностей от 0,6 до 400 кВт и построена на 17 стандартных высотах оси вращения от 50 до 355 мм (табл. 8.1 и 8.2). Серия включает основное исполнение двигателей, ряд модификаций и специализированные исполнения. Двигатели основного исполнения предназначены для нормальных условий работы и являются двигателями общего назначения. Это трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, рассчитанные на частоту сети 50 Гц. Они имеют исполнение по степени защиты IP44 во всем диапазоне высот оси вращения и IP23 в диапазоне высот осей вращения 160—355 мм.

Таблица 8.1. Увязка мощности и высоты оси вращения двигателей серии 4А, исполнение по степени защиты IP44

Высота оси вращения, мм	Условная длина сердечника, станины	Мощность, кВт, при числе полюсов $2p$					
		2	4	6	8	10	12
50	A	0,09	0,06	—	—	—	—
	B	0,12	0,09	—	—	—	—
56	A	0,18	0,12	—	—	—	—
	B	0,25	0,18	—	—	—	—
63	A	0,37	0,25	0,18	—	—	—
	B	0,55	0,37	0,25	—	—	—
71	A	0,75	0,55	0,37	—	—	—
	B	1,1	0,75	0,55	0,25	—	—
80	A	1,5	1,1	0,75	0,37	—	—
	B	2,2	1,5	1,1	0,55	—	—
90	LA(B)	3	2,2	1,5	0,75; (1,1)	—	—
100	S	4	3	—	—	—	—
	L	5,5	4	2,2	1,5	—	—
112	MA (B)	7,5	5,5	3 (4)	2 (3)	—	—
132	S	—	7,5	5,5	4	—	—
	M	11	11	7,5	5,5	—	—
160	S	15	15	11	7,5	—	—
	M	18,5	18,5	15	11	—	—
180	S	22	22	—	—	—	—
	M	30	30	18,5	15	—	—
200	M	37	37	22	18,5	—	—
	L	45	45	30	22	—	—
225	M	55	55	37	30	—	—
250	S	75	75	45	37	30	—
	M	90	90	55	45	37	—
280	S	110	110	75	55	37	—
	M	132	132	90	75	45	—
315	S	160	160	110	90	55	45
	M	200	200	132	110	75	55
355	S	250	250	160	132	90	75
	M	315	315	200	160	110	90

Таблица 8.2. Увязка мощности и высоты оси вращения двигателей серии 4А, исполнение по степени защиты IP23

Высота оси вра- щения, мм	Условная длина сер- дечника, мм	Мощность, кВт, при числе полюсов 2р					
		2	4	6	8	10	12
160	S	22	18,5	—	—	—	—
	M	30	22	—	—	—	—
180	S	37	30	10,5	15	—	—
	M	45	37	22	18,5	—	—
200	M	55	45	30	22	—	—
	L	75	55	37	30	—	—
225	M	90	75	45	37	—	—
	S	110	90	55	45	—	—
250	M	132	110	75	55	—	—
	S	160	132	90	75	45	—
280	M	200	160	110	90	55	—
	S	—	200	132	110	75	55
315	M	250	250	160	132	90	75
	S	315	315	200	160	110	90
355	M	400	400	250	200	132	110

В серии принята следующая система условных обозначений двигателей:

$\frac{4A}{1}$ $\frac{X}{2}$ $\frac{X}{3}$ $\frac{X}{4}$ $\frac{X}{5}$ $\frac{X}{6}$ $\frac{X}{7}$ $\frac{X}{8}$

Буквы и цифры в порядке следования их в условном обозначении означают следующее:

- 1 — название серии (4А);
- 2 — исполнение двигателей по степени защиты: буква Н — исполнение IP23, отсутствие буквы — исполнение IP44;
- 3 — исполнение по материалу станины и щитов: А — станина и щиты алюминиевые; Х — станина алюминиевая, щиты чугунные (или обратное сочетание материалов); отсутствие буквы — станина и щиты чугунные или стальные;
- 4 — высота оси вращения (две или три цифры), мм;
- 5 — установочный размер по длине станины: буквы S, M или L (меньший, средний или больший);
- 6 — длина сердечника: А — меньшая, В — большая при условии сохранения установочного размера; отсутствие буквы означает, что при данном установочном размере (S, M или L) выполняется только одна длина сердечника;

7 — число полюсов двигателя (одна или две цифры);

8 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69.

Примеры обозначений двигателей серии 4А:

4А160М4УЗ — асинхронный двигатель серии 4А исполнения по степени защиты IP44, с короткозамкнутым ротором, с чугунными станиной и подшипниковыми щитами, с высотой оси вращения 160 мм, средним установочным размером по длине станины (М), четырехполюсный, климатического исполнения У, категории размещения 3.

4АНК280S8УЗ — асинхронный двигатель серии 4А исполнения по степени защиты IP23, с фазным ротором, со стальной станиной и щитами высотой оси вращения 280 мм, с меньшим (S) установочным размером по длине станины, восьмиполюсный, климатического исполнения У, категории размещения 3.

Модификации и специализированные исполнения двигателей построены на базе основного исполнения и имеют те же принципиальные конструктивные решения основных элементов. Такие двигатели выпускаются отдельными отрезками серии на определенные высоты оси вращения и предназначены для применения в качестве приводов механизмов, предъявляющих специфические требования к двигателю или работающих в условиях, отличных от нормальных по температуре или чистоте окружающей среды, влажности и т.п.

К электрическим модификациям двигателей серии 4А относятся двигатели с повышенным номинальным скольжением, с повышенным пусковым моментом, многоскоростные, с частотой питания 60 Гц и т.п., к конструктивным модификациям — двигатели с фазным ротором, со встроенным электромагнитным тормозом, малошумные, со встроенной температурной защитой и т.п.

По условиям окружающей среды различают модификации двигателей тропического исполнения, влагоморозостойкого, химостойкого, сельскохозяйственного, пылезащищенные и др.

Специализированное исполнение имеют лифтовые двигатели, частотно-управляемые, высокоточные и др.

Двигатели различных модификаций и специализированного исполнения имеют те же обозначения, что и основного, но с добавочными буквами, проставляемыми либо после названия серии, либо после цифры, обозначающей число полюсов. Примеры обозначений модификаций и специализированных исполнений:

4АР... — двигатели с повышенным пусковым моментом;

4АС... — двигатели с повышенным номинальным скольжением;

4АК, 4АНК... — двигатели с фазным ротором, исполнения IP44 и IP23 соответственно;

4А...Е... — двигатели со встроенным электромагнитным тормозом,

4А...ОМ — двигатели для речных и морских судов гражданского флота.

Таблица 8.3

Мощность, кВт	Напряжение, В	Число выводных концов обмотки статора
0,06 – 0,37	220 или 380	3
0,55 – 11	220, 380 или 660	3
15 – 110	220/380 и 380/660	6
132–400	380/660	6

Номинальное напряжение двигателей и число выводных концов обмотки статора в зависимости от высоты оси вращения приведены в табл. 8.3.

Большинство двигателей серии 4А имеет степень защиты IP44 и выпущено в конструктивном исполнении, относящемся к группе IM1, т.е. с горизонтальным валом, на лапах, с двумя подшипниковыми щитами (рис. 8.7). Корпус двигателей выполнен с продольными радиальными ребрами, увеличивающими поверхность охлаждения и улучшающими отвод тепла от двигателя в окружающий воздух. На противоположном от рабочего конце вала укреплен вентилятор, прогоняющий охлаждающий воздух вдоль ребер корпуса. Вентилятор закрыт кожухом с отверстиями для прохода воздуха. В двигателях малой мощности вентилятор и кожух пластмассовые, в более мощных вентилятор литой из алюминиевого сплава, а кожух штампованный из тонкой листовой стали.

Магнитопровод двигателей шихтованный из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, причем двигателей с $h = 50 \div 250$ мм из стали марки 2013, а двигателей с $h = 280 \div 355$ мм — из стали марки 2312.

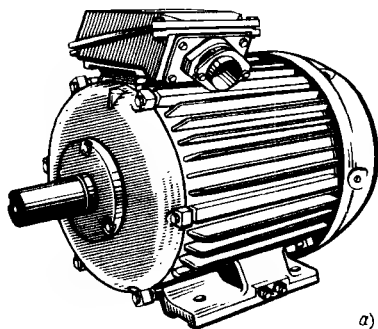
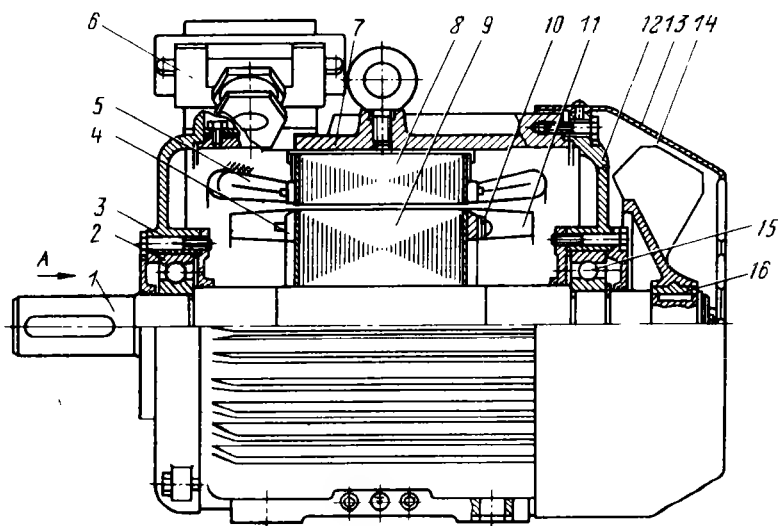
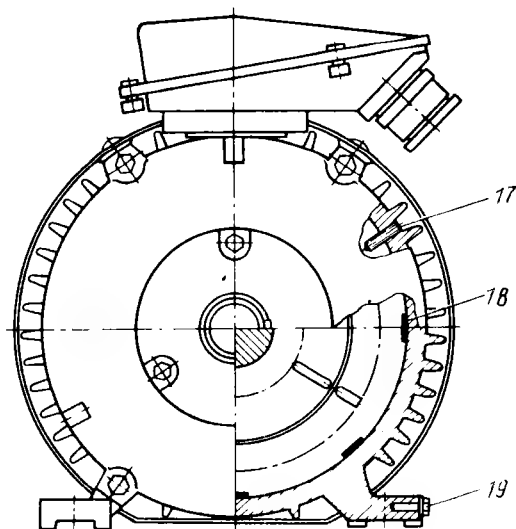


Рис. 8.7. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP44 (54), $h = 160$ мм, исполнения IM1001:

а — общий вид; б — продольный и поперечный разрезы; 1 — вал; 2, 15 — подшипники; 3, 12 — подшипниковые щиты; 4 — короткозамыкающие кольца ротора; 5 — лобовые части обмотки статора; 6 — коробка выводов; 7 — корпус; 8 — сердечник статора; 9 — сердечник ротора; 10 — балансировочные грузы; 11 — вентиляционные лопасти ротора; 13 — кожух вентилятора; 14 — вентилятор; 16 — втулка вентилятора; 17 — стопорные винты; 18 — скобы крепления сердечника статора; 19 — болты заземления



визд А



б)

Рис. 8.7. (б)

Листы сердечника статора в двигателях малой мощности крепят после опрессовки проваркой по наружной поверхности в нескольких местах, в двигателях большей мощности — стальными скобами, которые установлены по наружной поверхности сердечника. Сердечник статора запрессован непосредственно в корпус.

Во всех двигателях серии с $h < 280$ мм и в двигателях с $2p = 10$ и 12 всех высот оси вращения обмотка статора выполнены из круглого провода и пазы статора полузакрытые. При $h = 280 \div 355$ мм, кроме двигателей с $2p = 10$ и 12, катушки обмотки статора намотаны прямоугольным проводом, подразделенные и пазы статора полуоткрытые.

Сердечник ротора напрессован непосредственно на вал без промежуточной втулки, в двигателях с $h \leq 250$ мм — на гладкий вал. В двигателях с большей высотой оси вращения он крепится на валу с помощью шпунки.

Обмотка короткозамкнутого ротора — и стержни, и кольца — литая из алюминия. Вентиляционные лопасти на кольцах ротора служат для перемешивания воздуха, находящегося внутри машины. Этим обеспечивается перенос тепла, выделяющегося в обмотке ротора и лобовой части обмотки статора, к внутренним поверхностям корпуса и подшипниковых щитов, которые охлаждаются наружным воздухом с помощью внешнего вентилятора.

Подшипниковые щиты крепятся к корпусу с помощью четырех или шести болтов. Допуски на обработку поверхностей посадки щитов в станину обеспечивают необходимую точность центровки ротора относительно статора и, следовательно, точность размера воздушного зазора двигателя.

Коробка выводов расположена сверху станины, что облегчает монтажные работы при соединении двигателя с сетью.

В двигателях исполнения по степени защиты IP23 с высотой оси вращения 160–250 мм (рис. 8.8) корпус гладкий, без наружных ребер.

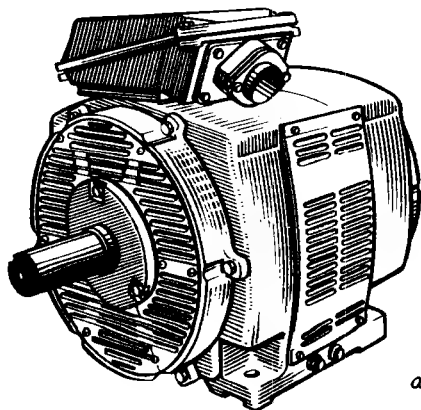


Рис. 8.8. Двигатель серии 4А с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23:

а — общий вид; б — продольный и поперечный разрезы: 1, 13 — подшипники; 2, 11 — диффузоры; 3, 8 — подшипниковые щиты; 4 — коробка выводов; 5 — стопорный винт; 6 — сердечник статора; 7 — корпус; 9 — лобовые части обмотки статора; 10 — короткозамыкающее кольцо обмотки ротора; 12 — вентиляционные лопасти; 14 — вал; 15 — скобы крепления сердечника статора; 16 — болт заземления; 17 — подшипниковая крышка

Сердечник статора крепится на внутренние продольные ребра корпуса таким образом, что между наружной поверхностью сердечника и корпусом образуются каналы для прохода охлаждающего воздуха. Охлаждение двигателей — радиальное двустороннее. Охлаждающий воздух проходит внутрь корпуса через жалюзи в подшипниковых щитах и направляется диффузорами на вентиляционные лопасти, отлитые вместе с обмоткой и замыкающими кольцами ротора. Вентиляционные лопасти отбрасывают воздух на лобовые части обмотки статора. Далее воздух

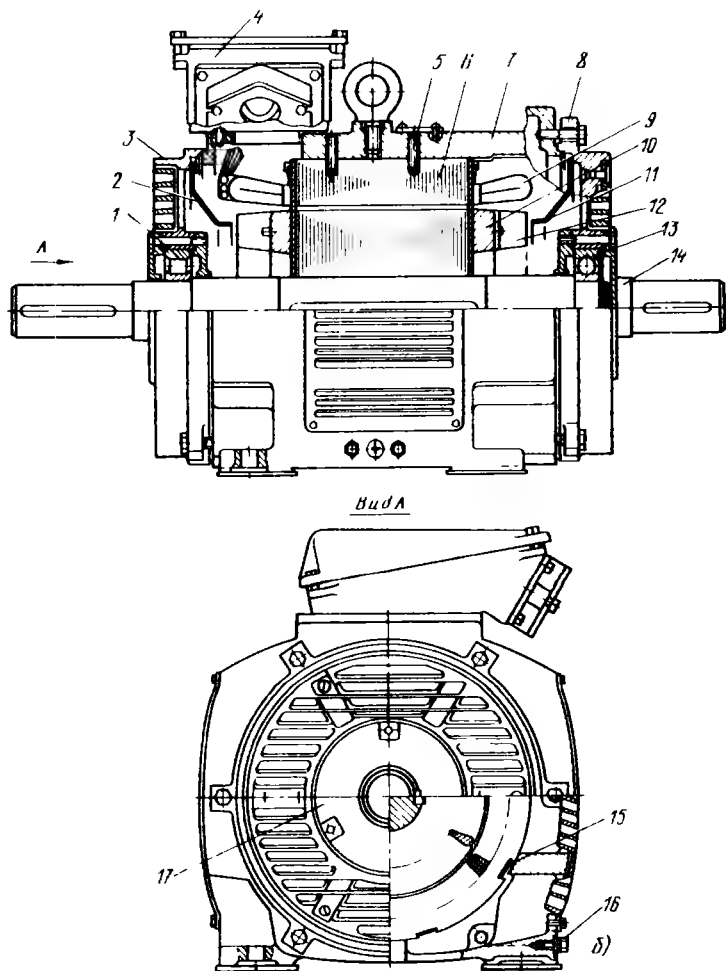


Рис. 8.8 (б)

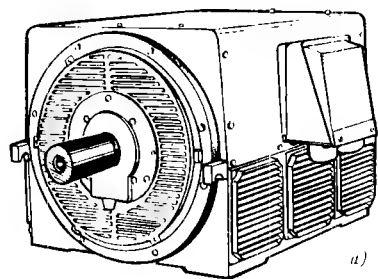
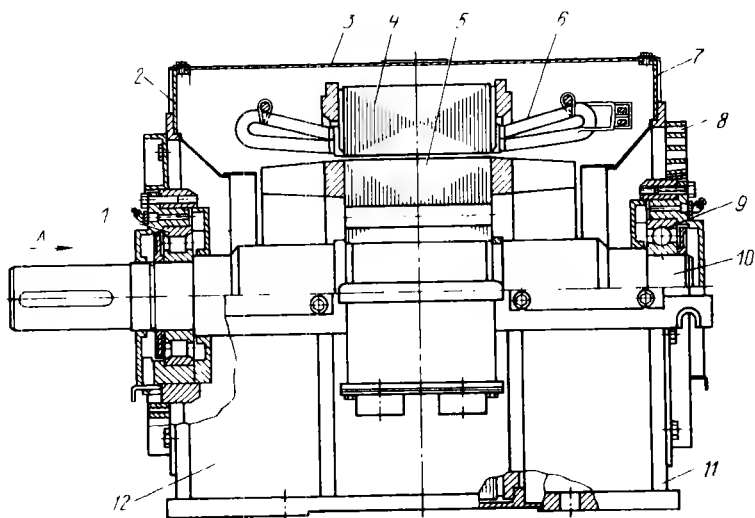
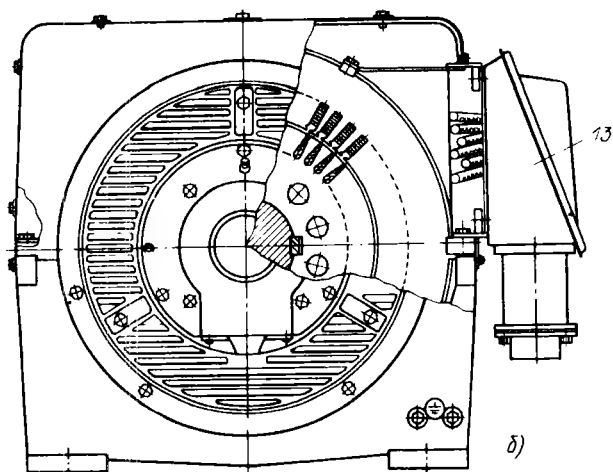


Рис. 8.9. Конструкция асинхронных двигателей серии 4А и АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23, $h = 280 \div 355$ мм:

a - общий вид; *б* - продольный и поперечный разрезы; 1, 9 - подшипники; 2, 7 - подшипниковые щиты; 3 - кожух двигателя; 4 - сердечник статора; 5 - сердечник ротора; 6 - лобовые части обмотки статора; 8 - торцевые жалюзи; 10 - вал; 11 - стойки корпуса; 12 - полустанина; 13 - коробка выводов



Вид А



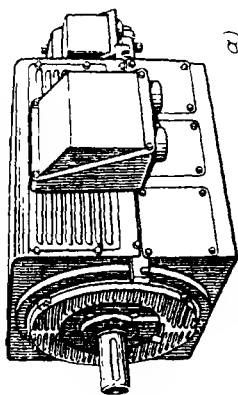
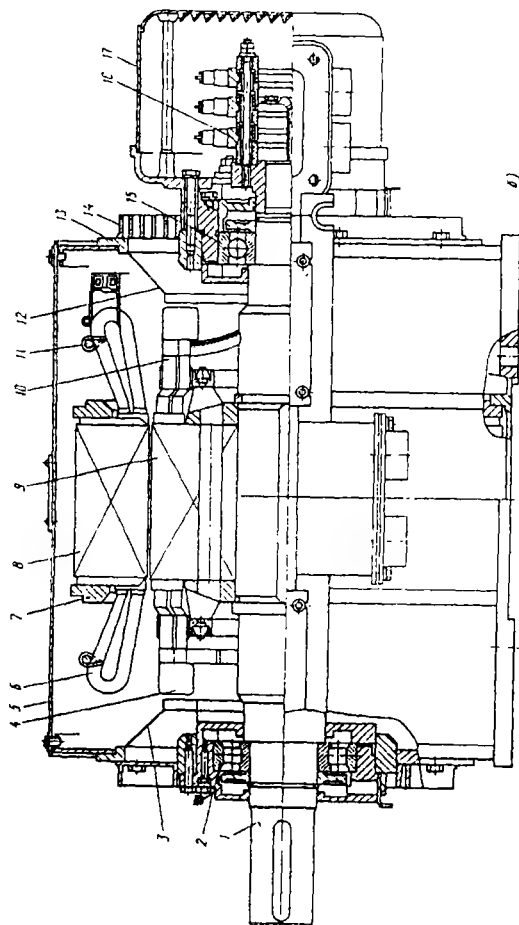


Рис. 8.10. Конструкция асинхронного двигателя с фазным ротором серии 4А со стелью защиты ПР23, $h = 280 \div 355$ мм.

a – общий вид; *б* – продольный разрез; *1* – вал; *2, 15* – подшипники; *3, 12* – диффузоры; *4* – вентиляционные лопатки; *5* – кожух; *6* – лобовые части обмотки статора; *7* – нажимные кольца статора; *8* – сердечник статора; *9* – сердечник ротора; *10* – лобовые части обмоток ротора; *11* – бандажное кольцо обмотки статора; *13* – подшипниковый щит; *14* – торцевые жалюзи; *16* – контактные кольца; *17* – кожух контактных колец



омывает наружную поверхность сердечника статора и выбрасывается через жалюзи, расположенные по бокам в нижней части корпуса.

Двигатели исполнения по степени защиты IP23 с высотой оси вращения 280 – 355 мм имеют отличную от рассмотренных выше конструкцию корпуса (рис. 8.9). Сварная из стального проката станина (полустанина) охватывает только нижнюю половину сердечника статора. К ней же крепят подшипниковые щиты. Верхняя часть корпуса выполнена штампованной из листовой стали. Охлаждение двигателей – двустороннее радиальное. В связи с отказом от цельной станины существенно уменьшилась общая масса двигателя, а выполнение корпуса в виде параллелограмма вместо традиционной для электрических машин цилиндрической формы позволило улучшить условия охлаждения двигателей без увеличения их габаритных размеров. В короткозамкнутых роторах двигателей с $h \geq 280$ мм выполняют закрытые пазы, в двигателях с $2p \geq 4$ – трапециевидные, сужающиеся к верхней части, при $2p = 2$ – лопаточные.

В фазных роторах (рис. 8.10) при прямоугольных с малым раскрытием пазах выполняют стержневую волновую обмотку. Выводные концы обмотки ротора проходят к контактным кольцам через внутреннее отверстие вала. Контактные кольца запрессованы в пластмассу и крепятся консольно к торцу вала. Весь щеточный узел закрыт кожухом из листовой стали.

В середине 80-х годов некоторые типоразмеры двигателей серии 4А модернизированы в целях повышения их энергетических показателей и надежности. Были несколько изменены размерные соотношения магнитопровода и обмоточные данные. В обозначении модернизированных двигателей после названия серии проставляется буква М – двигатели серии 4АМ. Остальная индексация и цифры в условном обозначении остались прежними. Основные элементы конструкции двигателей серии 4АМ, их установочно-присоединительные размеры и шкала мощностей остались такими же, как в серии 4А.

8.3. ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ АИ

Серия асинхронных двигателей АИ разработана в 80-х годах. В ее разработке принимали участие многие страны – члены СЭВ, входящие в организацию "Интерэлектро", что отражено в названии серии АИ – Асинхронные Интерэлектро. Для того чтобы двигатели были конкурентоспособны за рубежом, их качество и энергетические показатели должны находиться на уровне лучших зарубежных образцов. Кроме того, двигатели, выпускаемые в разных странах и разными фирмами, должны быть взаимозаменяемыми. Это возможно лишь в том случае, если ряды мощностей и установочно-присоединительных размеров серии, а также взаимная увязка их размеров и мощности будут одинаковы.

Благодаря тщательной подготовке производства и длительной конструкторско-технологической разработке, проводившейся в рамках "Интерэлектро", двигатели серии АИ по качеству и энергетическим показателям находятся на уровне лучших серийных двигателей, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами, а по массогабаритным показателям во многих типоразмерах превосходят их. При разработке серии приняты общие для двигателей большинства зарубежных стран шкалы мощностей и высот оси вращения, рекомендованные Международной электротехнической комиссией (МЭК). Вопрос об унификации взаимной увязки мощности двигателей и их установочно-присоединительных размеров (высоты оси вращения) остался окончательно не решенным. В настоящее время в мире существуют три системы увязки: принятая стандартом США (стандарт NEMA), принятая в стандартах большинства западноевропейских стран (CENELEC), и увязка, согласованная странами — участниками "Интерэлектро" (документ РС-3031) и отраженная в национальных стандартах СССР, ГДР и ряда других стран — членов СЭВ. В серии АИ принята увязка мощностей с высотой оси вращения, рекомендованная этим документом, однако для поставок на экспорт двигатели выпускают с увязкой, соответствующей стандартам CENELEC. В связи с этим двигатели серии АИ имеют разное обозначение: двигатели для внутрисоюзных поставок (увязка, соответствующая РС-3031) обозначаются АИР, а двигатели, поставляемые на экспорт (увязка, соответствующая CENELEC) — АИС (табл. 8.4 и 8.5).

Таблица 8.4. Увязка мощности и высоты оси вращения двигателей серии АИ, исполнение по степени защиты IP54

Высота оси вра- щения, мм	Услов- ная дли- на сер- дечника	Номинальная мощность, кВт, при числе полюсов 2р									
		Вариант Р						Вариант С			
		2	4	6	8	10	12	2	4	6	8
45	А	0,04	0,025	—	—	—	—	—	—	—	—
	В	0,06	0,04	—	—	—	—	—	—	—	—
50	А	0,09	0,06	—	—	—	—	—	—	—	—
	В	0,12	0,09	—	—	—	—	—	—	—	—
56	А	0,18	0,12	—	—	—	—	0,09	0,06	—	—
	В	0,25	0,18	—	—	—	—	0,12	0,09	—	—
63	А	0,37	0,25	0,18	—	—	—	0,18	0,12	0,06	—
	В	0,55	0,37	0,25	—	—	—	0,25	0,18	0,09	—
71	А	0,75	0,55	0,37	—	—	—	0,37	0,25	0,18	0,09
	В	1,1	0,75	0,55	0,25	—	—	0,55	0,37	0,25	0,12
80	А	1,5	1,1	0,75	0,37	—	—	0,75	0,55	0,37	0,18
	В	2,2	1,5	1,1	0,55	—	—	1,1	0,75	0,55	0,25

Продолжение табл. 8.4

Высота оси вра- щения, мм	Услов- ная дли- на сер- дечника	Номинальная мощность, кВт, при числе полюсов 2р									
		Вариант Р						Вариант С			
		2	4	6	8	10	12	2	4	6	8
90	S	—	—	—	—	—	—	1,5	1,1	0,75	0,37
	L	3,0	2,2	1,5	0,75; 1,1	—	—	2,2	1,5	1,1	0,55
100	S	4	3	—	—	—	—	—	—	—	—
	L	5,5	4	2,2	1,5	—	—	3	2,2; 3	1,5	—
112	M	7,5	5,5	3; 4	2,2; 3	—	—	4	4	2,2	1,5
132	S	—	7,5	5,5	4	—	—	5,5; 7,5	5,5	3	2,2
160	M	11	11	7,5	5,5	—	—	—	7,5	4; 5,5	3
	S	15	15	11	7,5	—	—	—	—	—	—
	M	18,5	18,5	15	11	—	—	11; 15	11	7,5	4; 5,5
	L	—	—	—	—	—	—	18,5	15	11	7,5
180	S	22	22	—	—	—	—	—	—	—	—
	M	30	30	18,5	15	—	—	22	18,5	—	—
200	L	—	—	—	—	—	—	—	22	15	11
	M	37	37	22	18,5	—	—	—	—	—	—
225	L	45	45	30	22	—	—	30; 37	30	18,5; 22	15
	S	—	—	—	—	—	—	—	37	—	18,5
250	M	55	55	37	30	—	—	45	45	30	22
	S	75	75	45	37	22	—	—	—	—	—
280	M	90	90	55	45	30	—	55	55	37	30
	S	110	110	75	55	37	—	75	75	45	37
315	M	132	132	90	75	45	—	90	90	55	45
	S	160	160	110	90	55	45	110	110	75	55
355	M	200	200	132	110	75	55	132	132	90	75
	S	250	250	160	132	90	75	—	—	—	—
	M	315	315	200	160	110	90	—	—	—	—

Анализ данных табл. 8.4 и 8.5 показывает, что двигатели АИР почти по всей шкале мощностей выпускаются с высотой оси вращения, на одну ступень меньшей, чем двигатели АИС. Размеры активной части двигателей, изготовленных по варианту Р или С (двигатели АИР и АИС), в большинстве типоразмеров одинаковы. Увеличение высоты оси вращения в двигателях АИС исполнения IM1001 достигается за счет увеличения высоты лап.

Таблица 8.5. Увязка мощности и высоты оси вращения двигателей серии АИ, исполнение по степени защиты IP23

Высота оси вращения, мм	Условная длина сердечника, станины	Номинальная мощность, кВт, при числе полюсов 2р									
		Вариант Р						Вариант С			
		2	4	6	8	10	12	2	4	6	8
200	М	55	45	30	22	—	—	45	37	22	18,5
	L	75	55	37	30	—	—	55	45	30	22
225	М	90	75	45	37	—	—	75	55	37	30
250	S	110	90	55	45	—	—	90	75	45	37
	М	132	110	75	55	—	—	110	90	55	45
280	S	160	132	90	75	—	—	—	110	75	55
	М	200	160	110	90	—	—	132	132	90	75
315	S	—	200	132	110	75	55	160	160	110	90
	М	250	250	160	132	90	75	200	200	132	110
355	S	315	325	200	160	110	90	250	250	160	132
	М	400	250	250	200	132	110	315	315	200	160

Двигатели серии АИР предназначены для привода вновь вводимого оборудования и замены двигателей серии 4А и модернизированной серии 4АМ на установленном оборудовании.

По варианту Р двигатели мощностью от 0,025 до 0,37 кВт выпускают на номинальное напряжение 220 и 380 В, мощностью от 0,55 до 11 кВт на напряжение 220, 380 или 660 В. Во всех этих двигателях обмотка статора соединена в звезду или в треугольник внутри корпуса и имеет три выводных конца, подведенных к коробке выводов. Двигатели мощностью более 11 кВт изготовляют с шестью выводными концами обмотки статора, причем при мощности 15–110 кВт — на напряжение 220/380 В и при мощности 132 кВт и более — на напряжение 380/660 В. По заказу потребителей все двигатели серии могут быть изготовлены с шестью выводными концами обмотки статора и на другие напряжения, предусмотренные в СТ СЭВ 4744-84.

Отдельные отрезки серии выпускают в следующих конструктивных исполнениях по способу монтажа (по ГОСТ 2479-79):

Высота оси вращения h , мм	Исполнение по способу монтажа
200–355	IM1001
45 250	IM1081; IM2081
280–355	IM1001, IM2001
45 –112	IM2181
45 –180	IM3001, IM3011, IM3031
200–280	IM3011, IM3031
45 112	IM3601, IM3611, IM3631
45 –250	IM5010

Структура обозначений двигателей серии АИ аналогична принятой для серии 4А, однако имеет некоторое отличие в индексации.

Различают обозначения базовое, основное и полное. В базовом обозначении буквами и цифрами указываются название серии, вариант привязки мощности к высоте оси вращения, высота оси вращения, установочный размер по длине станины и магнитопровода и число полюсов. Основное обозначение содержит, кроме того, указания вида защиты и охлаждения двигателя, той или иной его модификации и вида исполнения по условиям окружающей среды. В полном обозначении эти сведения дополняются электрическими и конструктивными характеристиками данного двигателя, например указанием номинального напряжения, конструктивного исполнения по способу монтажа, исполнения конца вала, выводного устройства и т.п.

Приведем расшифровку основного обозначения двигателей:

<u>АИ</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>
1	2	3	4	5	6	7	8

Буквы и цифры в порядке следования их в условном обозначении обозначают следующее:

- 1 — название серии;
- 2 — вариант увязки мощности с высотой оси вращения (Р или С);
- 3 — буквы, обозначающие исполнение по степени защиты от влияния окружающей среды, вид охлаждения, ту или иную электрическую модификацию;
- 4 — высота оси вращения, мм;
- 5 — буквы, указывающие установочный размер по длине станины и сердечника, соответственно S, М, L и А, В, С;
- 6 — число полюсов двигателя;
- 7 — буквы, обозначающие конструктивную модификацию;
- 8 — исполнение по условиям окружающей среды и категория размещения.

Для двигателей основного исполнения — на частоту питания 50 Гц, закрытых, с внешним обдувом (IP54), с короткозамкнутым ротором, предназначенных для эксплуатации в нормальных условиях в продолжительном режиме, — буквы в позициях 3 и 7 не проставляются.

Значения остальных символов обозначения приведены ниже:

Вид исполнения, модификация	Условное обозначение, буквы	
	русские	латинские
Исполнение по виду защиты и охлаждения		
Закрытое с внешним обдувом корпуса со встроенным вентилятором	Не указывается	
Закрытое с естественным охлаждением	Б	В

Вид исполнения, модификация	Условное обозначение, буквы	
	русские	латинские
Защищенное	Н	N
Открытое	Л	L
Закрытое продуваемое	П	P
С пристроенным вентилятором от отдельного двигателя (принудительное охлаждение)	Ф	F
Электрические модификации		
С повышенным скольжением	С	S
С повышенным пусковым моментом	Р	R
С регулируемой частотой вращения	Х	X
С фазным ротором	К	K
Для кратковременного режима работы	K_p	K_R
Конструктивные модификации		
С температурной защитой	Б	B
Малошумные	Н	N
С повышенной точностью установочных размеров	П	P
С высокой точностью установочных размеров	П2	P2
Со встроенным электромагнитным тормозом	Е	E
Встраиваемые	В	V

Примеры обозначения двигателей:

АИСН200М4Т2 — асинхронный двигатель серии АИ, увязка мощности по варианту С, Н — защищенного исполнения (IP23), высота оси вращения 200 мм, М — вторая длина корпуса по установочным размерам, четырехполюсный, Т2 — тропического исполнения;

АИРБР90S4НПУЗ — асинхронный двигатель серии АИ, увязка мощности по варианту Р (для внутрисююзных поставок), Б — закрытое исполнение с естественной вентиляцией без обдува, Р — с повышенным пусковым моментом, высота оси 90 мм, S — первая длина корпуса по установочным размерам, четырехполюсный, Н — малошумный, П — с повышенной точностью установочных размеров, УЗ — для умеренного климата, категория размещения 3.

Закрытые обдуваемые двигатели серии имеют исполнение по степени защиты от окружающей среды IP54, которое предусматривает, что двигатели защищены от попадания пыли внутрь корпуса в количестве, достаточном для нарушения его работы (цифра 5), и вода, разбрызгиваемая на оболочку двигателя с любой стороны, не оказывает вредного влияния на его работу (цифра 4). Общей конструктивной схемой двигателей исполнения по степени защиты IP54 является оребренный корпус (станина) с обдувом от наружного вентилятора, установленного на противоположном от рабочего конце вала, и сердечник ротора, непосредственно

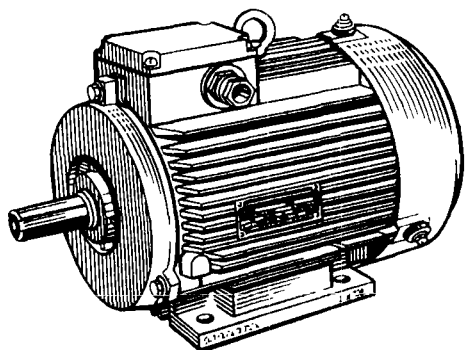


Рис. 8.11. Двигатель серии АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP54, $h = 100$ мм

насаженный на вал, с обмоткой, выполненной заливкой пазов алюминием.

Магнитопроводы двигателей выполнены из холоднокатаной электротехнической стали толщиной 0,5 мм, причем двигатели с $h = 45 \div 63$ мм — из стали марки 2013, с $h = 71 \div 160$ мм — марки 2214, с $h = 160 \div 250$ мм — марки 2212 или 2214 и с $h = 280 \div 355$ мм — из стали марки 2312 или 2412.

Отдельные элементы конструкции двигателей несколько различаются в зависимости от высоты оси вращения.

Двигатели с $h = 45 \div 112$ мм (рис. 8.11) имеют литые из высокопрочного алюминиевого сплава корпуса с горизонтально-вертикальным оребрением. Такая конструкция позволяет использовать для отливки четырехразъемные пресс-формы, что существенно упрощает технологию их изготовления. Корпуса отливают с лапами для крепления к фундаментной шпите и основанием коробки выводов. Подшипниковые щиты двигателей с высотой оси вращения до 63 мм также выполняют из алюминия. Они имеют наружные ребра для улучшения охлаждения. Сердечники статоров после опрессовки скрепляют несколькими швами сварки по наружной поверхности по длине сердечника. Наружные вентиляторы выполняют из высокопрочной и термостойкой пластмассы и защищают кожухом из того же материала.

Корпуса двигателей с $h = 132 \div 180$ мм мало отличаются от корпусов соответствующих двигателей серии 4А (см. рис. 8.7). Они выполняются либо из сплава алюминия с вертикально-горизонтальным оребрением, либо из чугуна с радиальным оребрением. По мере совершенствования технологии литья чугунные корпуса двигателей выполняются также с горизонтально-вертикальным оребрением, при этом массу чугунных отливок удается снизить на 15 — 25%. Подшипниковые щиты — чугунные без охлаждающих ребер. Вентиляторы из пластмассы выполняют только для двигателей с $h = 132$ мм. У двигателей с большей высотой оси вращения вентиляторы отливают из алюминиевого сплава на чугунную втулку для посадки на вал. Кожухи вентиляторов — штампованные

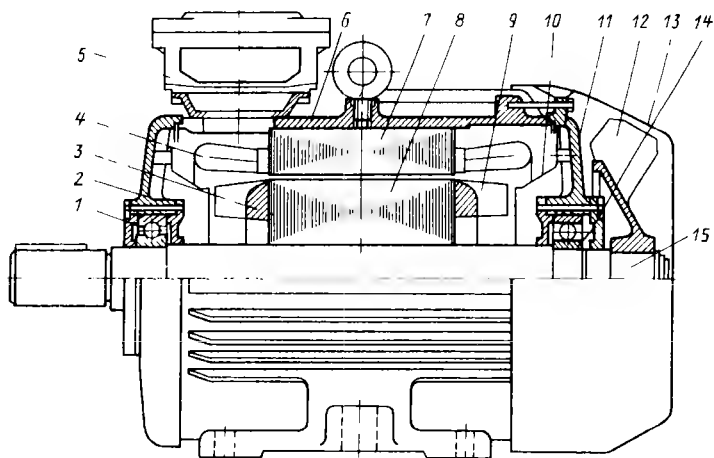


Рис. 8.12. Двигатель серии АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP54, $h = 225$ мм:

1, 14 подшипники; 2, 11 подшипниковые щиты; 3 – короткозамыкающее кольцо ротора; 4 – лобовые части обмотки статора; 5 – коробка выводов; 6 – корпус; 7 – сердечник статора; 8 – сердечник ротора; 9 – вентиляционные лопасти ротора; 10 – диффузоры; 12 – вентилятор; 13 – кожух вентилятора; 15 – вал

из листовой стали. Сердечники статоров у всех двигателей с $h \geq 132$ мм скреплены скобами, которые приваривают в нескольких местах к наружной поверхности сердечника.

Двигатели с $h = 200 \div 250$ мм (рис. 8.12) выпускают с чугунными литыми корпусами и подшипниковыми щитами. Оребрение корпусов – радиальное. Подшипниковые щиты имеют внутренние ребра, к которым крепят диффузоры, создающие направленный поток воздуха, заключенного в корпусе двигателя.

Корпуса двигателей с высотой оси вращения $h = 280 \div 355$ мм по своей конструкции резко отличаются от рассмотренных выше (рис. 8.13). Они выполняются из гофрированной рулонной стали толщиной 2–2,5 мм, что уменьшает их массу по сравнению с литыми из чугуна примерно в 2,8 раза. Подшипниковые щиты в двигателях чугунные. Лапы для крепления к фундаменту прикреплены к корпусу сваркой либо болтами.

Обмотка статора всех двигателей с $h = 45 \div 250$ мм и двигателей с $2p = 10$ и 12, с $h = 280 \div 355$ мм выполнена из круглого обмоточного провода (см. гл. 3). В двигателях меньших мощностей с $h = 45 \div 132$ мм она однослойная концентрическая, в ряде типоразмеров выполнена вразвалку. В двигателях с $h = 160 \div 250$ мм обмотка одно-двухслойная, а в многополюсных двигателях с $h = 280 \div 355$ мм она двухслойная концентрическая. Таким образом, конструкция и схемы обмоток из кругло-

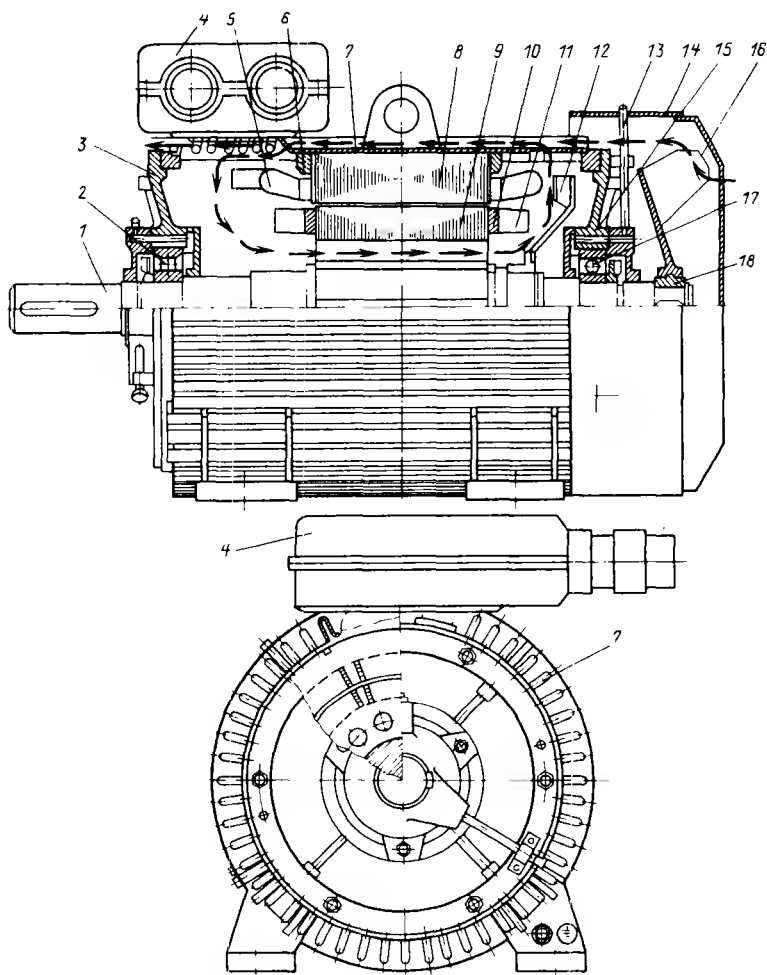


Рис. 8.13. Двигатель серии АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP54, $h = 280$ мм, с гофрированной станиной:

1 – вал; 2, 17 – подшипники; 3, 15 – подшипниковые щиты; 4 – коробка выводов; 5 – лобовые части обмотки статора; 6 – нажимное кольцо статора; 7 – гофрированная станина; 8 – сердечник статора; 9 – сердечник ротора; 10 – короткозамыкающие кольца; 11 – вентиляционные лопасти; 12 – внутренний вентилятор; 13 – масленка для смазки подшипника; 14 – кожух вентилятора; 16 – наружный вентилятор; 18 – втулка вентилятора; стрелками показаны направления потоков охлаждающего воздуха

го провода всех двигателей серии позволяет применять механизированные способы ее намотки.

Обмотка статора двигателей с $h = 280 \div 355$ мм (кроме 10- и 12-полюсных) выполнена из прямоугольного обмоточного провода, двухслойная из подразделенных катушек, что позволяет укладывать их в полуоткрытые пазы статора. Лобовые части обмотки укреплены бандажными кольцами. С помощью дистанционных прокладок между лобовыми частями катушек обмотки создаются промежутки для прохода охлаждающего воздуха.

Обмотки двигателей всех высот оси вращения выполнены проводом марки ПЭТМ-155 или ПЭТД-180. Для пазовой и межфазовой изоляций применены материалы на основе фенелона, имеющие класс нагревостойкости F. Так как расчетный нагрев обмоток соответствует классу нагревостойкости B, то при таком решении повысилась надежность обмотки.

Обмотки короткозамкнутых роторов выполнены заливкой сплавом алюминия. Одновременно отливают и замыкающие кольца с вентиляционными лопатками. Для крепления балансировочных грузов в замыкающих кольцах роторов двигателей с $h \leq 200$ мм предусмотрены кольцевые канавки, а в двигателях с большей высотой оси вращения — штыри между вентиляционными лопатками.

Все двигатели исполнения по степени защиты IP54 охлаждаются с помощью наружного вентилятора, прогоняющего окружающий двигатель воздух вдоль ребер корпуса. Перенос тепла от обмотки ротора и лобовых частей обмотки статора к внутренней поверхности корпуса и подшипниковых щитов происходит за счет циркуляции воздуха, находящегося внутри корпуса. В двигателях с $h = 45 \div 180$ мм воздух перемещается вентиляционными лопатками замыкающих колец. В двигателях с $h = 200 \div 250$ мм внутри корпуса вентиляционными лопатками создается направленная циркуляция воздуха. Для этого на внутренних ребрах подшипниковых щитов с обоих торцов сердечника ротора установлены диффузоры (см. рис. 8.12).

Диффузоры разделяют область пониженного давления — перед вентиляционными лопатками и повышенного давления — над лопатками. Воздух нагревается, соприкасаясь с замыкающими кольцами и вентиляционными лопатками ротора и лобовыми частями обмотки статора, проходит к внутренней поверхности корпуса, в полость между диффузором и внутренними ребрами подшипниковых щитов и отдает им тепло.

В двигателях с $h = 280 \div 355$ мм с гофрированным корпусом (рис. 8.13) схема охлаждения отличается от рассмотренной выше. В сердечниках роторов этих двигателей выполнены аксиальные вентиляционные каналы, а внутри корпуса установлен центробежный вентилятор. Внутренний вентилятор прогоняет нагретый от лобовых частей обмоток ротора и статора воздух в полости, образованные ребрами гофрированного корпуса и наружной поверхностью сердечника статора. В то же время наружный вентилятор направляет холодный воздух, окружающий

двигатель, вдоль ребер снаружи корпуса. Этим достигается более интенсивное охлаждение воздуха, заключенного внутри корпуса. Охлажденный воздух поступает в аксиальные каналы ротора и вновь к лопаткам внутреннего вентилятора.

В защищенном исполнении двигателя с короткозамкнутым ротором выпускаются в диапазоне осей вращения от 200 до 355 мм со степенью защиты IP23. Корпуса и подшипниковые щиты двигателей несколько отличны по своей конструкции от двигателей исполнения IP54. Это связано с изменением системы вентиляции. Двигатели имеют двустороннюю радиальную систему вентиляции. Нагнетательными элементами служат вентиляционные лопатки на замыкающих кольцах. Как и в двигателях исполнения по степени защиты IP54, лопатки служат также радиаторами, отводящими тепло от пазовой части стержней обмотки ротора. В двигателях с $h = 200 \div 250$ мм (см. рис. 8.4) воздух засасывается через жалюзи в подшипниковых щитах торцов ротора, направляется диффузорами на вентиляционные лопатки ротора, охлаждает обмотку ротора и отбрасывается лопатками на лобовые части обмотки статора, обдувает внешнюю поверхность сердечника статора и выходит наружу через жалюзи в средней части корпуса двигателя. Корпуса двигателей этого отрезка серии отлиты из чугуна и внутри имеют продольные ребра, которые служат для установки сердечника статора. Сердечник закреплен на ребрах эксцентрично по отношению к корпусу, и площадь поперечного сечения вентиляционных каналов сверху сердечника больше, чем снизу.

Корпуса двигателей с $h = 280 \div 355$ мм, так же как и в аналогичных двигателях серии 4А (см. рис. 8.9), состоят из сварной полустанины, выполненной из стального листа, и штампованного из листовой стали верхнего кожуха. На полустанине имеются четыре вертикальные стойки, соединенные с основанием продольными планками, а сверху между собой продольными ребрами. В кольцевых проточках боковых ребер располагаются подшипниковые щиты. Сердечник статора устанавливается нижней своей половиной на центрирующие заточки внутренних стоек и крепится с помощью массивных нажимных колец. Вентиляция двигателей — радиальная двусторонняя. Циркуляция охлаждающего воздуха имеет такую же схему, как в двигателях исполнения со степенью защиты IP23 меньших высот оси вращения.

Асинхронные двигатели с фазными роторами выпускаются как модификации серии АИР (АИС) в диапазоне высот оси вращения 160 — 355 мм в исполнениях по степени защиты IP44 — АИРФ (АИСФ) и IP23 — АИРНФ. Обмотки фазных роторов двигателей мощностью до 50 — 60 кВт выполнены из круглого провода, двухслойные, равнокатушечные с укороченным шагом. Пазы ротора — трапециевидные, полузакрытые. В двигателях большей мощности обмотки стержневые волновые, пазы с параллельными стенками, полузакрытые с узким штифом. В пазовой части обмотка закреплена клиньями, в лобовой части — бандажами из стальной проволоки или нетканой (бандажной) стеклотенты.

Напряжение на кольцах ротора у большинства двигателей примерно равно линейному напряжению обмотки статора.

Двигатели с фазными роторами со степенью защиты IP54 имеют ребристый корпус и охлаждаются наружным вентилятором, как и двигатели с короткозамкнутыми роторами. Контактные кольца расположены внутри корпуса (рис. 8.14) в полости, отдельной от статора перегородкой с лабиринтными уплотнениями, предотвращающими попадание пыли от щеток на обмотки статора и ротора.

Контактные кольца двигателей исполнения IP23 с высотой оси вращения 160 — 200 мм (рис. 8.15) установлены на выступающем конце вала, противоположном рабочему, и закрыты кожухом с отверстиями для прохода охлаждающего воздуха. Контактные кольца с токоотводами запрессованы в пластмассу. В пластмассовой части колец (рис. 8.16,а) имеются отверстия для прохода охлаждающего воздуха и вентиляционные лопасти для засасывания воздуха в пространство между кольцами. Выводные концы обмотки ротора подходят к контактным кольцам через внутреннее отверстие на валу ротора.

Вентиляция двигателей — аксиальная. Центробежный вентилятор установлен рядом с сердечником ротора со стороны, противоположной рабочему концу вала. Охлаждающий воздух засасывается через жалюзи в подшипниковом щите, омывает лобовые части обмоток ротора и статора, наружную поверхность сердечника статора, лобовые части обмоток с другого торца сердечника и выбрасывается вентилятором через жалюзи в нижней части подшипникового щита. Часть воздуха проходит через

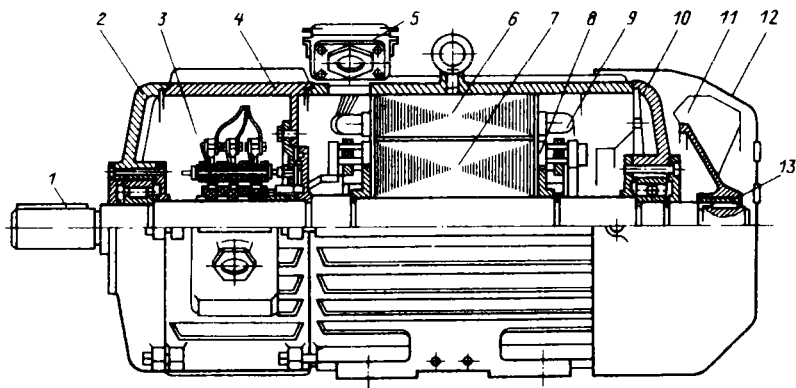


Рис. 8.14. Двигатель серии АИ с фазным ротором со степенью защиты IP54, $h = 180$ мм:

1 — вал; 2, 10 — подшипниковые щиты; 3 — контактные кольца; 4 — корпус; 5 — коробка выводов; 6 — сердечник статора; 7 — сердечник ротора; 8 — лобовые части обмотки ротора; 9 — лобовые части обмотки статора; 11 — вентилятор; 12 — кожух вентилятора; 13 — втулка вентилятора

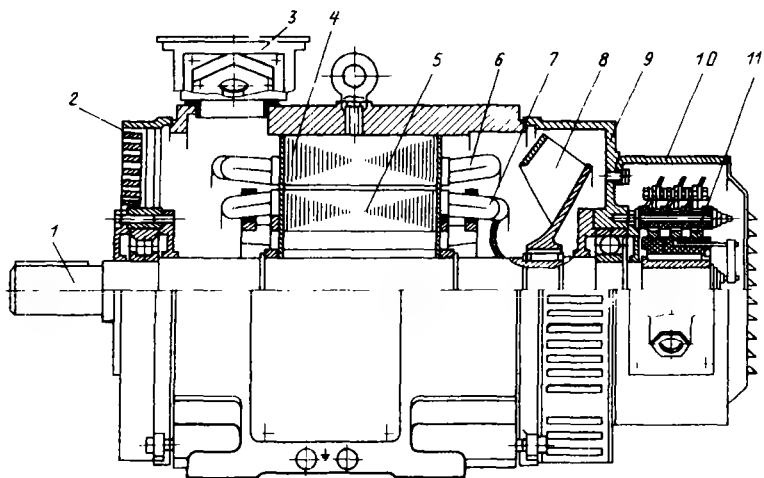


Рис. 8.15. Двигатель серии АИ с фазным ротором со степенью защиты IP23, $h = 180$ мм, с аксиальной вентиляцией:

1 - вал; 2, 9 - подшипниковые щиты; 3 - коробка выводов; 4 - сердечник статора; 5 - сердечник ротора; 6 - лобовые части обмотки статора; 7 - лобовые части обмотки ротора; 8 - вентилятор; 10 - кожух контактных колец; 11 - контактные кольца

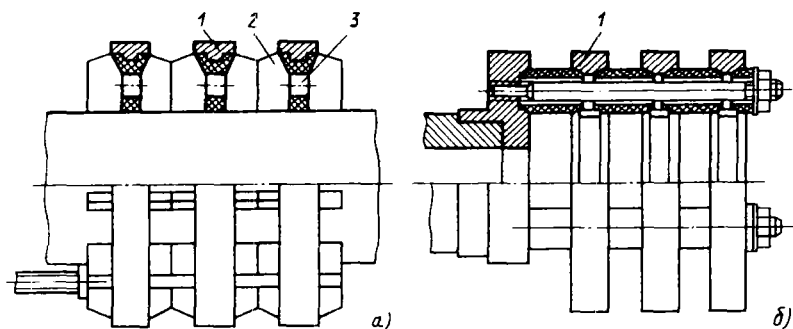


Рис. 8.16. Контактные кольца асинхронного двигателя с фазным ротором:

а - с посадкой на вал; б - консольное крепление; 1 - контактные кольца; 2 - вентиляционные лопатки; 3 - отверстия для прохода охлаждающего воздуха

аксиальные каналы в сердечнике статора и отводит тепло, выделяющееся в роторе.

В двигателях с $h = 225 \div 355$ мм (см. рис. 8.5) вентиляция — радиальная, двусторонняя. Роторные вентиляторы расположены с двух сторон сердечника ротора. Контактные кольца укреплены на выступающем конце вала и закрыты кожухом. В двигателях с $h \geq 280$ мм они крепятся консольно к несущему фланцу, установленному на валу, с помощью трех шпилек (рис. 8.16, б). Токоподводы к обмотке ротора проходят через центральное отверстие в валу.

Большинство двигателей других модификаций и специализированных исполнений серии АИ выпускаются со степенью защиты IP54 в тех или иных диапазонах высоты оси вращения. Они отличаются от рассмотренных либо отдельными конструктивными элементами, например встроенным электромагнитным тормозом, либо схемами обмоток (многоскоростные двигатели), материалом заливки пазов или размерными соотношениями зубцовой зоны (двигатели с повышенным скольжением или пусковым моментом), либо усиленными уплотнениями вала, подшипниковых щитов, вводного устройства, а также защитными и лакокрасочными покрытиями и т.п. (двигатели тропического или химостойкого исполнения).

Кроме единых всесоюзных серий асинхронных двигателей общего назначения выпускается ряд серий двигателей специального назначения, например крановые двигатели серии МТ, взрывозащищенные серии 2ВР и др. Асинхронные двигатели малой мощности для ручного электрифицированного инструмента, бытовой техники и специализированные для различного вида автоматических систем выпускаются электротехнической промышленностью в массовом количестве.

Мы рассмотрим вопросы проектирования асинхронных двигателей общего назначения, в основном, на базе общесоюзных серий АИ и 4А. Отдельные вопросы расчета и конструирования специализированных двигателей и микродвигателей, а также двигателей высокого напряжения большой мощности несколько отличаются от изложенных в учебнике, однако основные методы расчета тех или иных элементов конструкции, магнитной цепи и параметров машин принципиально остаются такими же, как и для двигателей общего назначения.

8.4. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ И РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА

Техническое задание на учебное проектирование асинхронного двигателя содержит номинальные данные проектируемой машины и указания о режиме ее работы, об исполнении по способу монтажа, о степени защиты от воздействия окружающей среды и системе охлаждения. Кроме того, могут быть заданы также дополнительные требования к проекти-

руемому двигателю, например наименьшие допустимые значения кратности максимального и минимального моментов, а для двигателей с короткозамкнутыми роторами также предельные значения пускового тока и наименьшие значения пусковых моментов. В отношении требований, не оговоренных в задании, спроектированная машина должна удовлетворять соответствующим ГОСТ.

Проектирование новой машины начинают с выбора базовой модели, на которую ориентируются при проведении всех расчетов, начиная с выбора главных размеров, и при разработке конструкции отдельных узлов. За базовую обычно выбирается конструкция двигателя одной из новых серий, выпускаемых в настоящее время. Например, при проектировании асинхронных двигателей общего назначения малой и средней мощности (до 400 кВт) в качестве базовой модели следует выбирать конструкцию двигателей серии 4А или АИ предусмотренного в техническом задании исполнения.

В начальной стадии проектирования при выборе главных размеров и электромагнитных нагрузок необходимо учесть дополнительные требования технического задания. Если проектируемая машина должна иметь большой максимальный момент, то индуктивное сопротивление ее обмоток не должно быть большим, поэтому в такой машине нецелесообразно выбирать малое значение индукций, большую линейную нагрузку, узкие и глубокие пазы и т.п.

Требования к пусковым характеристикам с короткозамкнутым ротором следует обязательно учитывать при выборе конфигурации пазов ротора. Так, узкие и глубокие пазы с сужающейся верхней частью обеспечивают большое увеличение расчетного активного сопротивления ротора при пуске и большие пусковые моменты, но при таких пазах возрастает индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора и уменьшаются перегрузочная способность двигателя и коэффициент мощности при номинальном режиме.

Полностью учесть все требования технического задания к характеристикам двигателя при выборе размеров магнитопровода и обмотки машины, не ориентируясь на данные выпущенных машин, невозможно. Поэтому перед началом расчета следует детально изучить конструкцию базового двигателя, критически оценить принятые в ней соотношения размеров, уровни электромагнитных нагрузок и другие данные и лишь после этого приступить к расчету. Расчет асинхронных машин начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра статора D и расчетной длины магнитопровода l_δ . Размеры D и l_δ связаны с мощностью, угловой скоростью и электромагнитными нагрузками выражением машинной постоянной:

$$\frac{D^2 l_\delta \Omega}{P'} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{об} A B_\delta} \quad (8.1)$$

В начальный период расчета двигателя все величины, входящие в (8.1), кроме синхронной угловой скорости, неизвестны. Поэтому расчет проводят, задаваясь на основании имеющихся рекомендаций значениями электромагнитных нагрузок (A и B_δ), коэффициентов (α_δ , k_B и k_{o6}), и приближенно определяют расчетную мощность P' . Остаются два неизвестных (D и l_δ), однозначное определение которых без дополнительных условий невозможно. Таким условием является отношение l_δ/D или более употребительное в расчетной практике отношение $\lambda = l_\delta/\tau$. Это отношение в значительной степени определяет экономические данные машин, а также оказывает влияние на характеристики и условия охлаждения двигателей.

Анализ показывает, что у большинства выполненных асинхронных двигателей общего назначения отношение λ изменяется в достаточно узких пределах. Поэтому для определения D и l_δ можно предварительно выбрать то или иное отношение λ , характерное для заданного исполнения и числа полюсов машины. Это позволит однозначно определить главные размеры, исходя из (8.1). Однако внутренний диаметр статора непосредственно связан определенными размерными соотношениями с внешним диаметром статора D_a , в свою очередь определяющим высоту оси вращения h , значение которой при проектировании новых двигателей может быть принято только из стандартного ряда высот, установленных ГОСТ.

Внешний диаметр статора должен также соответствовать определенным условиям, налагаемым требованиями раскроя листов электротехнической стали с наименьшими отходами при штамповке. С учетом этих требований при ручном расчете асинхронного двигателя более целесообразным является выбор главных размеров, основанный на предварительном определении высоты оси вращения, увязке этого размера с внешним диаметром статора и последующем расчете внутреннего диаметра статора D .

В связи с этим выбор главных размеров проводят в следующей последовательности.

Высоту оси вращения предварительно определяют по рис. 8.17, а или б для заданных P_2 и $2p$ в зависимости от исполнения двигателя.

Из ряда высот осей вращения (см. табл. П6.2) принимают ближайшее к предварительно найденному меньшее стандартное значение h . Следует иметь в виду, что ГОСТ определяет стандартные высоты осей вращения независимо от назначения и конструктивного исполнения асинхронных двигателей, поэтому высота оси вращения любого проектируемого двигателя должна быть равна одному из этих значений.

Внешний диаметр сердечника статора выбирают, исходя из следующего. Зависимость (8.1) показывает, что при одной и той же длине l_δ мощность P' изменяется пропорционально D^2 . Поэтому машину при выбранной высоте оси вращения выгодно выполнять с возможно большим диаметром. Максимально возможный диаметр D_a должен быть $D_a \leq$

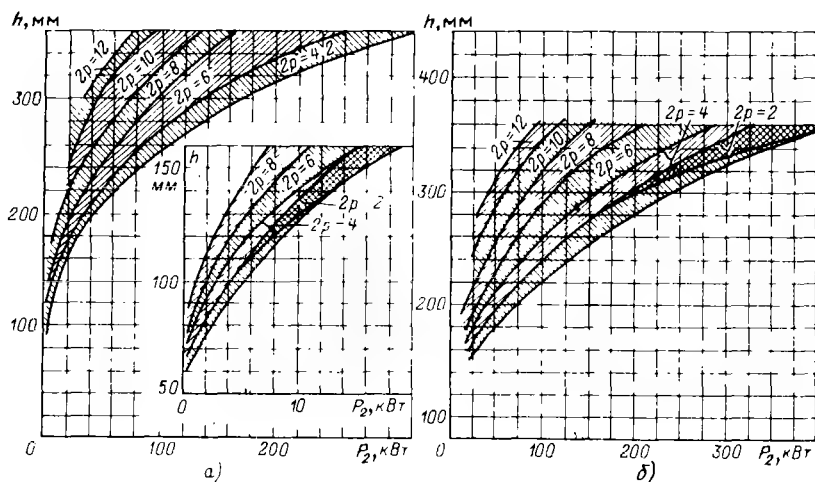


Рис. 8.17. Высота оси вращения h двигателей различных мощности и частоты вращения:

a — со степенью защиты IP44; b — со степенью защиты IP23

$\leq 2(h - h_{1min})$, где h_{1min} — минимальное расстояние от стали сердечника статора до опорной плоскости машины (рис. 8.18), включающее толщину корпуса $b_{корп}$ и расстояние от корпуса до опорной плоскости h_2 . Если машина выполняется со сварной станиной, то допустимое расстояние h_{1min} уменьшается. В том случае, когда $h_1 \gg h_{1min}$, в нижней части корпуса оребренных двигателей исполнения со степенью защиты IP44 размещают несколько охлаждающих ребер, высота которых может быть меньше, чем у расположенных на верхней и боковых частях корпуса.

Обычно расстояние h_1 выбирают равным или несколько большим h_{1min} , значения которого для двигателей с различной высотой оси вращения h приведены на рис. 8.19. При выборе D_a должно быть учтено также требование использования для штамповки роторной или листовой электротехнической стали стандартных размеров с наименьшими отходами.

Внешние диаметры сердечников статоров двигателей серий в зависимости от высоты оси вращения при учебном проектировании могут быть приняты по данным табл. 8.6.

Внутренний диаметр статора D в общем случае может быть определен по внешнему диаметру, высотам ярма и зубцов статора:

$$D = D_a - 2(h_a + h_z).$$

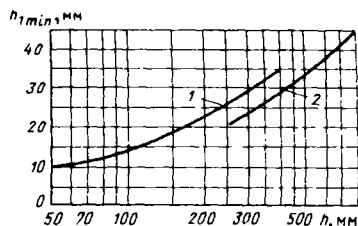
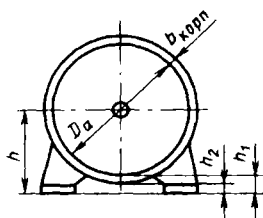


Рис. 8.18. К выбору наружного диаметра D_a статора

Рис. 8.19. Минимально допустимое расстояние h_1 от сердечника статора до опорной поверхности двигателя в зависимости от высоты оси вращения двигателей со станиной:

1 – литой; 2 – сварной

Таблица 8.6. Внешние диаметры статоров асинхронных двигателей различных высот оси вращения

h , мм	56	63	71	80	90
D_a , мм	0,08–0,096	0,1–1,08	0,116–0,122	0,131–0,139	0,149–0,157
h , мм	100	112	132	160	180
D_a , мм	0,168–0,175	0,191–0,197	0,225–0,233	0,272–0,285	0,313–0,322
h , мм	200	225	250	280	315 355
D_a , мм	0,349–0,359	0,392–0,406	0,437–0,452	0,52–0,53	0,59 0,66

На данном этапе расчета размеры h_a и h_z неизвестны. Поэтому для определения D используют эмпирические зависимости, основанные на следующем.

При одном и том же уровне индукции на участках магнитопровода в машинах с одинаковым D высота яра статора будет пропорциональна потоку, а следовательно, обратно пропорциональна числу полюсов машины (прямо пропорциональна полюсному делению). Принимая, что размеры пазов не зависят от числа полюсов машины, получаем приближенное выражение

$$D = K_D D_a. \quad (8.2)$$

Значения коэффициентов K_D , приведенные в табл. 8.7, характеризуют отношения внутренних и внешних диаметров сердечников статоров асинхронных двигателей серий 4А и АИ при различных числах полюсов и

Таблица 8.7. Отношение $K_D = D/D_a$ в асинхронных двигателях
в зависимости от числа полюсов

$2p$	2	4	6	8	10–12
K_D	0,52–0,6	0,62–0,68	0,7–0,72	0,72–0,75	0,75–0,77

могут быть использованы для предварительного определения D вновь проектируемой машины.

Далее находят полюсное деление τ , м:

$$\tau = \pi D / 2p, \quad (8.3)$$

и расчетную мощность P' , В·А:

$$P' = mIE = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos \varphi}, \quad (8.4)$$

где P_2 — мощность на валу двигателя, Вт; k_E — отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, которое может быть приближенно определено по рис. 8.20.

Предварительные значения η и $\cos \varphi$, если они не указаны в задании на проектирование, находятся по ГОСТ. Приближенные значения η и $\cos \varphi$ могут быть приняты по кривым рис. 8.21.

Предварительный выбор электромагнитных нагрузок A , А/м, и B_δ , Тл, должен быть проведен особо тщательно, так как они определяют не только расчетную длину сердечника, но и в значительной степени характеристики машины. При этом, если главные размеры машины зависят от произведения AB_δ [см. (8.1)], то на характеристики двигателя оказывает существенное влияние также и соотношение между этими величинами. Рекомендации по выбору A и B_δ , представленные в виде кривых на рис. 8.22 – 8.24 для машин различных мощности и исполнения, основаны на данных изготовленных двигателей [11], характеристики которых удовлетворяют требованиям ГОСТ. На каждом из рисунков даются области их допустимых значений. При выборе конкретных значений A и B_δ в пределах рекомендуемой области следует, руковод-

ствуясь приведенными выше замечаниями, учитывать требования технического задания к характеристикам проектируемого двигателя.

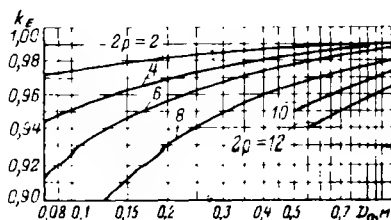


Рис. 8.20. Значения коэффициента k_E

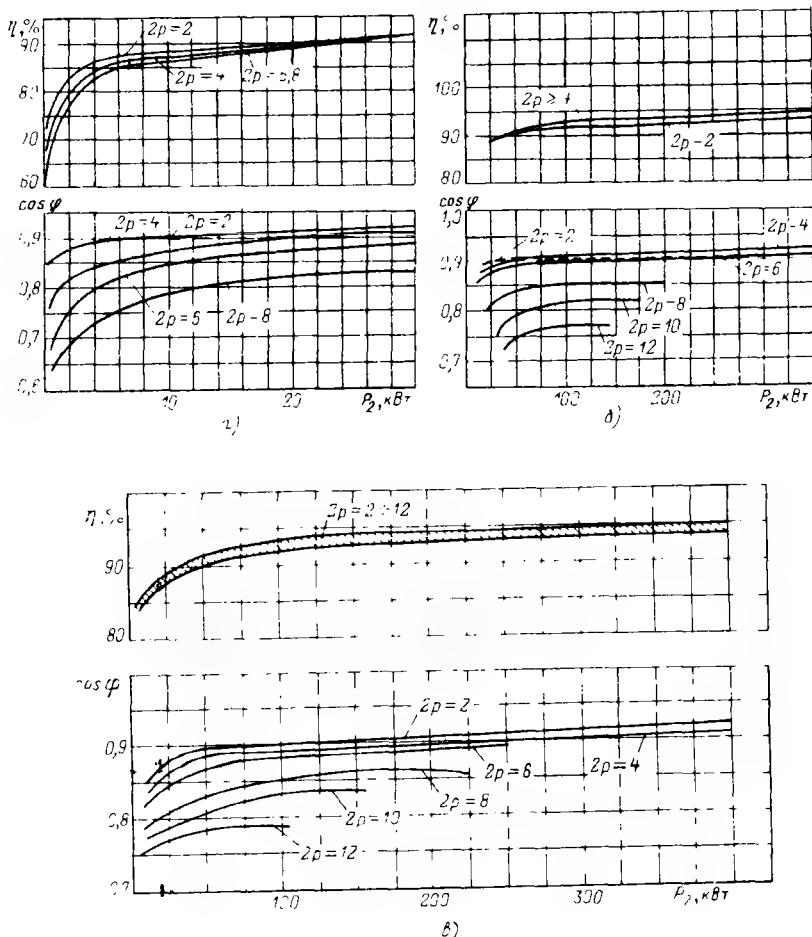


Рис. 8.21. Примерные значения КПД и $\cos \varphi$ асинхронных двигателей:
 а — со степенью защиты IP44 и мощностью до 30 кВт; б — со степенью защиты IP44 и мощностью до 400 кВт; в — со степенью защиты IP23

Коэффициент полюсного перекрытия α_δ и коэффициент формы поля k_B в асинхронных машинах определяются степенью уплощения кривой поля в зазоре, возникающей при насыщении зубцов статора и ротора, и могут быть достаточно достоверно определены только после расчета магнитной цепи. Поэтому для расчета магнитной цепи удобнее рассматривать синусоидальное поле, а влияние уплощения учесть при расчете магнитного напряжения отдельных участков магнитной цепи. Основываясь

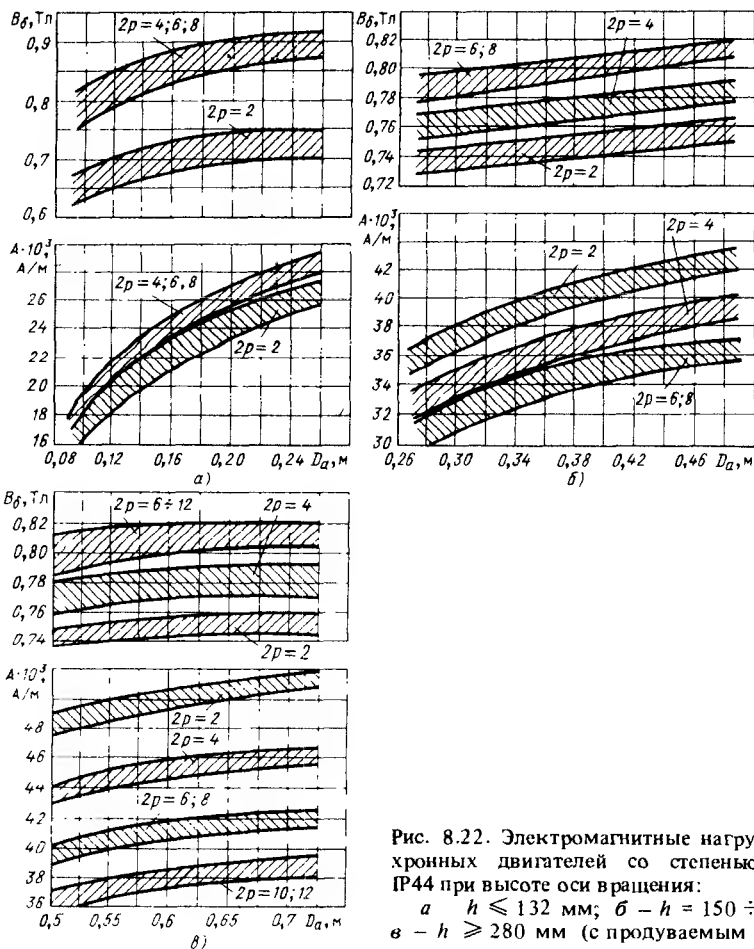


Рис. 8.22. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей со степенью защиты IP44 при высоте оси вращения:

а $h \leq 132$ мм; б — $h = 150 \div 250$ мм; в — $h \geq 280$ мм (с продуваемым ротором)

на этом, значения коэффициентов предварительно принимают равными:

$$\alpha_\delta = 2/\pi \approx 0,64; \quad k_B = \pi/(2\sqrt{2}) = 1,11.$$

Предварительное значение обмоточного коэффициента $k_{об1}$ выбирают в зависимости от типа обмотки статора. Для однослойных обмоток $k_{об1} = 0,95 \div 0,96$. Для двухслойных и одно-двухслойных обмоток при $2p = 2$ следует принимать $k_{об1} = 0,90 \div 0,91$ и при большей полюсности $k_{об1} = 0,91 \div 0,92$.

Синхронная угловая скорость двигателя Ω , рад/с, рассчитывается по

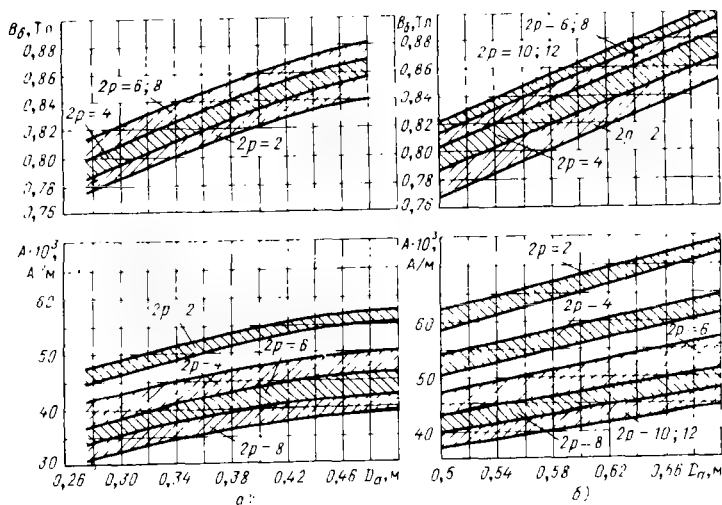


Рис. 8.23. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей со степенью защиты IP23 при высоте оси вращения:

$a \quad h = 160 \div 250 \text{ мм}; \quad \sigma - h \geq 280 \text{ мм}$

формуле

$$\Omega = 2\pi \frac{n_1}{60} \quad \text{или} \quad \Omega = 2\pi \frac{f_1}{p}, \quad (8.5)$$

где n_1 — синхронная частота вращения, об/мин; f_1 — частота питания, Гц.

Из (8.1) с учетом значения a_δ расчетная длина магнитопровода, м,

$$l_\delta = \frac{P'}{D^2 \Omega k_B k_{\alpha \beta 1} A B_\delta}. \quad (8.6)$$

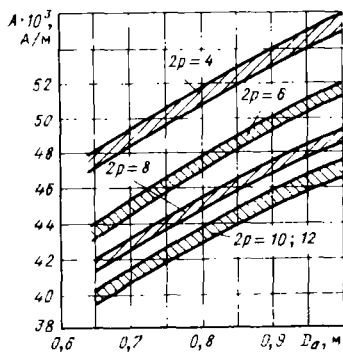
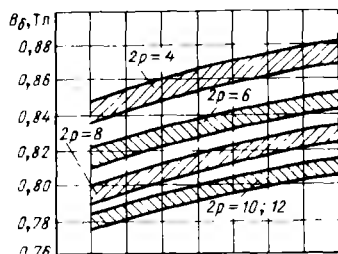


Рис. 8.24. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей высокого напряжения со степенью защиты IP23

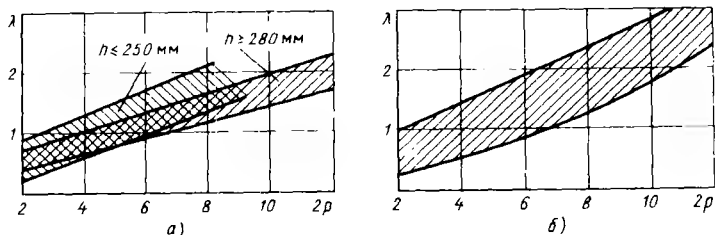


Рис. 8.25. Отношение $\lambda = l_{\delta}/\tau$ у двигателей исполнения по степени защиты:
а – IP44; б – IP23

Критерием правильности выбора главных размеров D и l_{δ} служит отношение $\lambda = l_{\delta}/\tau$, которое обычно находится в пределах, показанных на рис. 8.25 для принятого исполнения машины. Если λ оказывается чрезмерно большим, то следует повторить расчет для ближайшей из стандартного ряда большей высоты оси вращения h . Если λ слишком мало, то расчет повторяют для следующей в стандартном ряду меньшей высоты h .

На этом выбор главных размеров заканчивается. В результате проведенных вычислений получены значения высоты оси вращения h , внутреннего диаметра статора D , внешнего диаметра статора D_a , расчетной длины магнитопровода l_{δ} и полюсного деления τ .

Для расчета магнитной цепи помимо l_{δ} необходимо определить полностью конструктивную длину и длину стали сердечников статора (l_1 и $l_{ст1}$) и ротора (l_2 и $l_{ст2}$). В асинхронных двигателях, длина сердечников которых не превышает 250–300 мм, радиальные вентиляционные каналы не делают. Сердечники вихтуются в один пакет. Для такой конструкции

$$l_1 = l_{ст1} = l_{\delta}. \quad (8.7)$$

В более длинных машинах сердечники подразделяют на отдельные пакеты, разделенные между собой радиальными вентиляционными каналами. В двигателях с фазными роторами или со сварной короткозамкнутой обмоткой пакеты выполняют длиной 40–60 мм. Крайние пакеты могут быть более длинными. В двигателях с литой короткозамкнутой обмоткой ротора число пакетов по технологическим соображениям из-за сложности заливки уменьшают и пакеты выполняют более длинными.

Стандартная ширина радиального воздушного канала между пакетами $b_k = 10$ мм. Число пакетов $n_{пак}$ и их длина $l_{пак}$ связаны с расчетной длиной следующим соотношением:

$$n_{пак} = l_{ст}/l_{пак} \approx l_{\delta}/l_{пак} = \text{целое число}, \quad (8.8)$$

при этом число радиальных каналов $n_k = n_{\text{пак}} - 1$.

Длина стали сердечника статора в таких машинах

$$l_{\text{ст1}} = l_{\text{пак}} n_{\text{пак}}, \quad (8.9)$$

или при пакетах разной длины

$$l_{\text{ст1}} = \Sigma l_{\text{пак}}. \quad (8.10)$$

Конструктивная длина сердечника статора

$$l_1 = l_{\text{ст1}} + b_k n_k. \quad (8.11)$$

Окончательное значение l_δ для машин с $\delta < 1,5$ мм

$$l_\delta \approx l_{\text{ст1}}. \quad (8.12)$$

В машинах с $\delta \geq 1,5$ мм при расчете l_δ учитывают искривление магнитных силовых линий потока в воздушном зазоре над радиальными вентиляционными каналами (см. § 4.2):

$$l_\delta \approx l_1 - b'_k n_k, \quad (8.13)$$

где b'_k — расчетная ширина радиальных каналов, зависящая от соотношения δ и b_k . Значение b'_k при $b_k = 10$ мм определяется по табл. 8.8, либо из выражения

$$b'_k = \gamma' \delta, \quad (8.14)$$

где

$$\gamma' = \frac{2(b_k/\delta)^2}{5 + 2(b_k/\delta)}.$$

Конструктивную длину сердечника ротора в машинах с $h < 250$ мм берут равной длине сердечника статора, т.е. $l_2 = l_1$. В двигателях больших габаритов ротор выполняют длиннее статора за счет увеличения длины его крайних пакетов на 5 мм и в крупных машинах высокого напряжения — на 10 мм.

Таблица 8.8. Расчетная ширина радиальных каналов b'_k при $b_k = 10$ мм

δ , мм	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0
b'_k , мм	7,3	7,1	7,0	6,9	6,8	6,7	6,2	5,7

Длина стали сердечника ротора

$$l_{ст2} = \Sigma l_{пак2} = l_2 - n_{\kappa} b_{\kappa}. \quad (8.15)$$

Следующий этап расчета включает определение числа пазов статора Z_1 и числа витков в фазе обмотки статора w_1 . При этом число витков фазы обмотки статора должно быть таким, чтобы линейная нагрузка двигателя и индукция в воздушном зазоре как можно более близко совпадали с их значениями, принятыми предварительно при выборе главных размеров, а число пазов статора обеспечивало достаточно равномерное распределение катушек обмотки.

Чтобы выполнить эти условия, вначале выбирают предварительно зубцовое деление t_{Z1} в зависимости от типа обмотки, номинального напряжения и полюсного деления машины. Для более равномерного распределения катушек обмотки по длине окружности зазора необходимо большое число пазов, а следовательно, маленькие зубцовые деления. В то же время ширина паза, составляющая примерно половину зубцового деления, не должна быть слишком малой, так как в этом случае ухудшается заполнение паза медью обмотки, а в машинах небольшой мощности может также недопустимо уменьшиться механическая прочность зубцов. Кроме того, надо иметь в виду, что стоимость машины с увеличением числа пазов возрастает, так как увеличиваются сложность штампа и трудоемкость изготовления и укладки обмоток.

Значения зубцовых делений статора асинхронных двигателей с обмоткой из круглого провода, необходимые для предварительного выбора числа пазов, приведены на рис. 8.26. Меньшие значения в каждой из показанных на рисунке областей возможных значений t_{Z1} характерны для машин меньшей мощности для каждого из диапазонов высот осей вращения. Следует отметить, что двигатели с $h \geq 280$ мм обычно выполняют с обмоткой из прямоугольного провода, но в многополюсном исполнении при $2p \geq 10$ (в двигателях с $h = 280$ и 315 мм) из-за малой высоты спинки статора размещение лобовых частей катушек из прямоугольного провода затруднено, поэтому такие машины выполняют с обмоткой из круглого провода, имеющей мягкие, легко поддающиеся формовке лобовые части.

Для машин с обмоткой из прямоугольного провода при $U_{ном} \leq 660$ В и в высоковольтных машинах t_{Z1} зависит от мощности и но-

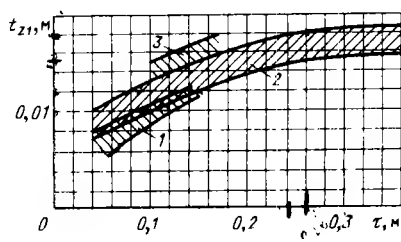


Рис. 8.26. Зубцовые деления статоров асинхронных двигателей с обмоткой из круглого провода с высотами оси вращения:

1 — $h \leq 90$ мм; 2 — $90 < h \leq 250$ мм;
3 — $h \geq 280$ мм

Таблица 8.9. Зубцовое деление статора t_{Z1} , мм,
при прямоугольных пазах

Полюсное деление T , мм	Напряжение, В		
	до 660	3000	6000
$< 0,15$	0,016–0,02	0,022–0,025	0,024–0,03
0,15–0,4	0,017–0,022	0,024–0,027	0,026–0,024
$> 0,4$	0,02 –0,028	0,026–0,032	0,028–0,038

минального напряжения и может быть взято в соответствии с данными табл. 8.9. В процессе расчета целесообразно не ограничиваться выбором какого-либо одного конкретного зубцового деления, а, руководствуясь приведенными выше соображениями, рассмотреть диапазон возможных значений t_{Z1} в пределах указанных значений зубцовых делений $t_{Z1min} \div t_{Z1max}$. Тогда возможность числа пазов статора, соответствующих выбранному диапазону t_{Z1} ,

$$Z_{1min} \div Z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{Z1max}} \div \frac{\pi D}{t_{Z1min}}. \quad (8.16)$$

Окончательное число пазов статора Z_1 следует выбирать в полученных пределах с учетом условий, налагаемых требованиями симметрии обмотки, и желательного для проектируемой машины значения числа пазов на полюс и фазу q_1 . Число пазов статора в любой обмотке асинхронных машин должно быть кратно числу фаз, а число $q_1 = Z_1/(2pm)$ в большинстве асинхронных машин должно быть целым. Лишь в многополюсных асинхронных двигателях иногда выполняют такое число пазов, при котором q_1 является дробным, причем большей частью со знаменателем дробности, равным двум, например $q_1 = 2\frac{1}{2}$ или $3\frac{1}{2}$. В отдельных случаях это правило может быть нарушено, однако необходимо иметь в виду, что обмотки с дробным q_1 при сравнительно небольших числах пазов и полюсов, характерных для большинства асинхронных двигателей, приводят к некоторой асимметрии МДС. Поэтому выбор окончательного числа пазов следует проводить с четкой увязкой и контролем получаемого при этом числа q . Окончательное значение $t_{Z1} = \pi D/(2pmq)$ не должно выходить за указанные выше пределы более чем на 10% и в любом случае для двигателей с $h \geq 56$ мм не должно быть менее 6–7 мм.

При определении числа эффективных проводников в пазу u_n руководствуются следующим: u_n должно быть целым, а в двухслойной обмотке желательно, чтобы оно было кратным двум. Применение двухслойных обмоток с нечетным u_n допускается лишь в исключительных случаях, так как это приводит к необходимости выполнять разовитко-

вые катушки, что усложняет технологию изготовления и укладки обмотки. Поэтому полученные в расчете числа u_{Π} приходится округлять до ближайшего целого или четного числа. Чтобы это округление не было слишком грубым (что особенно заметно при малых u_{Π}), вначале определяют предварительное число эффективных проводников в пазу u'_{Π} при условии, что параллельные ветви в обмотке отсутствуют ($a = 1$):

$$u'_{\Pi} = \pi D A / I_{\text{ном}} Z_1, \quad (8.17)$$

где A — принятое ранее значение линейной нагрузки, А/м; $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток обмотки статора, А:

$$I_{\text{ном}} = P_2 / (m U_{\text{ном}} \eta \cos \varphi) \quad (8.18)$$

(η и $\cos \varphi$ заданы или выбраны в начале расчета).

Полученное по (8.17) значение u'_{Π} не округляют до целого, а находят такое число параллельных ветвей обмотки a , при котором число эффективных проводников в пазу либо будет полностью удовлетворять отмеченным условиям, либо потребует лишь незначительного изменения:

$$u_{\Pi} = a u'_{\Pi}. \quad (8.19)$$

Число a при этом, естественно, может быть взято только из ряда возможных чисел параллельных ветвей для обмотки данного типа и заданного числа полюсов (см. гл. 3).

Полученное из (8.19) число u_{Π} округляют до ближайшего целого или четного в зависимости от типа обмотки.

Принятое на данном этапе расчета число параллельных ветвей a в дальнейшем, при выборе размеров и числа элементарных проводников, может быть изменено. В этом случае пропорционально изменяется также и u_{Π} .

Окончательное число витков в фазе обмотки

$$w_1 = u_{\Pi} Z_1 / (2 a m). \quad (8.20)$$

Окончательное значение линейной нагрузки, А/м,

$$A = 2 I_{\text{ном}} w_1 m / (\pi D). \quad (8.21)$$

Оно, как правило, незначительно отличается от принятого ранее, так как его изменение определяется только отношением рассчитанного по (8.19) и принятого числа эффективных проводников в пазу u_{Π} . Полученное значение A нужно сопоставить с рекомендуемым (см. рис. 8.22–8.24).

Схему обмотки статора выбирают в зависимости от мощности машины, ориентируясь на конструкцию и предполагаемую технологию укладки обмотки в пазы. Машины мощностью до 12–15 кВт в большин-

стве случаев имеют однослойную концентрическую обмотку из круглого провода. В машинах большей мощности обмотки выполняют двухслойными, а при механизированной укладке применяют одно-двухслойные или двухслойные концентрические обмотки, которые могут быть уложены в пазы без подъема шага. Все обмотки из прямоугольного провода выполняют только двухслойными, равнокатушечными.

Обмоточный коэффициент $k_{об} = k_p k_y$ рассчитывают в зависимости от числа пазов на полюс и фазу q и укорочения шага обмотки $\beta = u_{расч}/\tau$, где $u_{расч}$ — расчетный шаг, определяемый по формулам, приведенным в § 3.6, в зависимости от типа обмотки.

В двухслойных обмотках асинхронных двигателей шаг выполняют в большинстве случаев с укорочением, близким к $\beta = 0,8$.

После расчета $k_{об1}$ уточняют значение потока Φ , Вб:

$$\Phi = \frac{k_E U_1}{4k_B w_1 k_{об1} f_1}, \quad (8.22)$$

и определяют индукцию в воздушном зазоре B_δ , Тл:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{a_\delta \tau l_\delta} = \frac{p\Phi}{D l_\delta}. \quad (8.23)$$

Если полученное значение B_δ выходит за пределы рекомендуемой области (см. рис. 8.22–8.24) более чем на $\pm 5\%$, следует принять другое значение числа u_n и повторить расчет.

Если линейная нагрузка и индукция в воздушном зазоре при принятом числе пазов и эффективных проводников в пазу находятся в рекомендуемых пределах, переходят к расчету сечения эффективного проводника и обмоточного провода.

Сечение эффективных проводников, мм^2 , определяют, исходя из тока одной параллельной ветви и допустимой плотности тока в обмотке:

$$q_{эф1} = I_{ном} / (a J_1). \quad (8.24)$$

С точки зрения повышения использования активных материалов плотность тока J_1 должна быть выбрана как можно большей, но при этом возрастают потери в меди обмотки. Увеличение потерь сказывается, во-первых, на повышении температуры обмотки и, во-вторых, на КПД двигателя. В асинхронных двигателях общего назначения при принятой в них системе косвенного охлаждения влияние плотности тока на нагрев обмотки более существенно, чем на КПД. На этом основании определены качественные зависимости допустимой плотности тока в обмотках различных машин. Она повышается с уменьшением габаритов машины, с увеличением допустимого нагрева обмотки при переходе на другой, более высокий класс нагревостойкости изоляции и с повышением интен-

сивности охлаждения (например, в машинах защищенного исполнения по сравнению с закрытыми обдуваемыми двигателями).

Нагрев пазовой части обмотки зависит от произведения линейной нагрузки на плотность тока (AJ). Поэтому выбор допустимой плотности тока производят с учетом линейной нагрузки двигателя:

$$J = (AJ)/A. \quad (8.25)$$

Значения (AJ) для асинхронных двигателей различных исполнения и мощности приведены на рис. 8.27.

Для всыпных обмоток могут быть использованы обмоточные провода диаметром не более 1,8 мм, однако в современных двигателях для повышения надежности обмотки и упрощения ее укладки в пазы исполь-

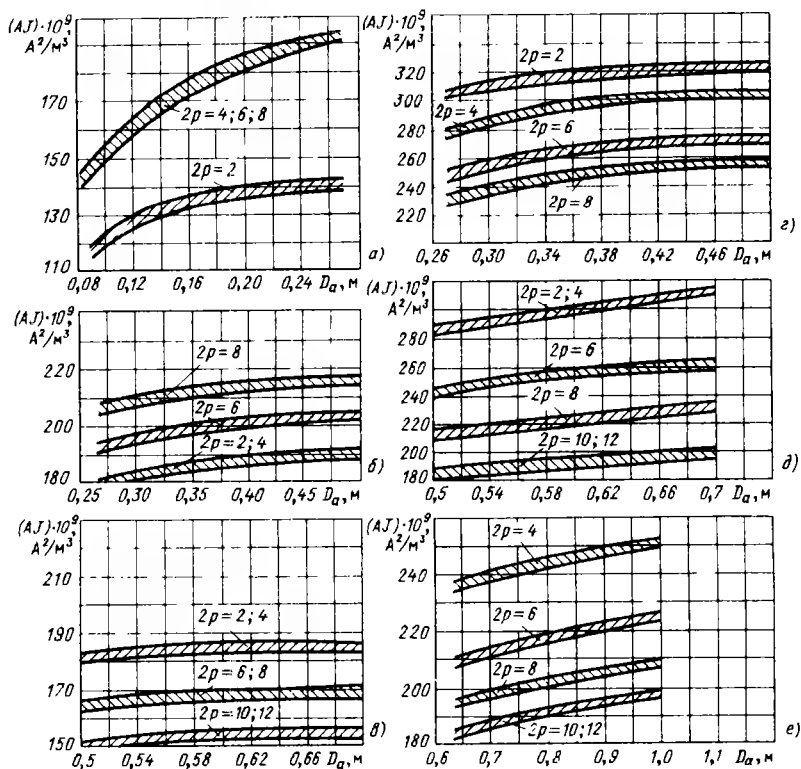


Рис. 8.27. Средние значения произведения AJ асинхронных двигателей со степенью защиты:

a — IP44, $h \leq 132$ мм; $б$ — IP44, $h = 160 \div 250$ мм; $в$ — IP44, $h = 280 \div 355$ мм; (при продуваемом роторе); $г$ — IP23, $h = 160 \div 250$ мм; $д$ — IP23, $h = 280 \div 355$ мм; e — IP23 при $\sigma_{ном} = 6000$ В

зуют провода меньшего диаметра. В обмотках, предназначенных для механизированной укладки, диаметр изолированного провода обычно берут не более 1,4 мм, а при ручной укладке (двигатели с $h > 160$ мм) — не более 1,7 мм.

Если расчетное сечение эффективного проводника в машинах со вспынной обмоткой выше значений, соответствующих указанным диаметрам, то эффективный проводник делят на несколько элементарных. Для этого по табл. ПЗ.1 подбираются сечение $q_{эл}$ и число элементарных проводников $n_{эл}$, составляющих один эффективный, таким образом, чтобы диаметр $d_{эл}$ элементарных проводников не выходил за указанные пределы, а их суммарная площадь сечения была близка к расчетному сечению эффективного проводника:

$$q_{эл} n_{эл} = q_{эф}. \quad (8.26)$$

В обмотках из круглого провода число элементарных проводников может быть взято до 8—10, но при большом $n_{эл}$ возрастают технологические трудности намотки катушек, поэтому в современных машинах стремятся уменьшить число элементарных проводников в одном эффективном до 6—8, для чего увеличивают число параллельных ветвей. В двухполюсных двигателях $n_{эл}$ увеличивают, поскольку число параллельных ветвей в них не может быть более двух.

При проектировании машин с обмоткой из прямоугольного провода сечение каждого проводника не должно быть взято более 17—20 мм², так как в этом случае становится заметным возрастание потерь на вихревые токи.

Если расчетное значение $q_{эф} > 20$ мм², то прямоугольные проводники подразделяют на элементарные так, чтобы $q_{эл} \leq 17 \div 20$ мм².

В обмотках из прямоугольного провода, укладываемых в открытые пазы, $n_{эл}$ обычно не более 2. При $n_{эл} = 2$ они располагаются на одном уровне по высоте паза (см. рис. 3.7). Обмотку с четырьмя элементарными проводниками (см. рис. 3.7,б) в асинхронных двигателях применяют редко. Если обмотка выполняется из подразделенных катушек, которые укладывают в полукрытые пазы (см. рис. 3.6,б), то всегда образуются два элементарных проводника, так как катушки, расположенные на одной высоте в пазу, соединяются параллельно (см. § 3.2).

При прямоугольных обмоточных проводах сечение эффективного проводника не должно превышать 35—40 мм², поэтому при большом номинальном токе в таких машинах выполняют наибольшее возможное число параллельных ветвей.

По одной и той же площади поперечного сечения прямоугольных проводников их линейные размеры $a \times b$ могут быть различны, поэтому окончательный выбор обмоточного провода производят одновременно с расчетом размеров зубцовой зоны.

После окончательного выбора $q_{эл}$, $n_{эл}$ и a следует уточнить плотность тока в обмотке, которая может несколько измениться по сравне-

нию с предварительно принятой при подборе сечений элементарных проводников:

$$I = I_{\text{ном}} / (a q_{\text{эл}} n_{\text{эл}}). \quad (8.27)$$

На этом расчет обмотки статора заканчивается. Некоторая корректировка, которая может потребоваться в ходе последующего расчета, как правило, не вносит существенных изменений в полученные данные.

8.5. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ СТАТОРА

Размеры пазов в электрических машинах должны быть выбраны таким образом, чтобы, во-первых, площадь поперечного сечения паза соответствовала количеству и размерам размещаемых в нем проводников обмотки с учетом всей изоляции, и, во-вторых, чтобы значения индукций в зубцах и ярме статора находились в определенных пределах, зависящих от типа, мощности, исполнения машины и от марки электротехнической стали сердечника. Конфигурация пазов и зубцов определяется типом обмотки, который в свою очередь зависит от мощности, номинального напряжения и исполнения машины. Расчет размеров зубцовой зоны проводят по допустимым индукциям в ярме и в зубцах статора (табл. 8.10).

Обмотка из прямоугольного провода укладывается в прямоугольные пазы (рис. 8.28). Боковые стенки таких пазов параллельны, поэтому зубцы статора имеют трапецидальное сечение, и индукция в них неравномерна. Обычно задаются значениями допустимой индукции в ярме статора B_a и индукцией $B_{Z\max}$ в наиболее узком сечении зубца $b_{Z\min}$ либо индукцией $B_{Z\ 1/3}$ в сечении зубца с шириной $b_{Z\ 1/3}$, взятом на расстоянии, равном $1/3$ его высоты от наиболее узкой части зубца (рис. 8.28).

По выбранным значениям индукций определяются:

высота ярма статора, м,

$$h_a = \Phi / (2 B_a l_{\text{ст1}} k_{\text{с1}}); \quad (8.28)$$

минимальная ширина зубца, м,

$$b_{Z\ \min} = \frac{B_{\delta\prime Z\ 1} l_{\delta}}{B_{Z\ \max} l_{\text{ст1}} k_{\text{с1}}} \quad (8.29)$$

или ширина зубца на расстоянии $1/3$ его высоты от наиболее узкой части

$$b_{Z\ 1/3} = \frac{B_{\delta\prime Z\ 1} l_{\delta}}{B_{Z\ 1/3} l_{\text{ст1}} k_{\text{с1}}}. \quad (8.30)$$

Таблица 8.10. Допустимые значения индукции на участках магнитной цепи асинхронных двигателей, Тл

Участок магнитной цепи	Обозначение	Исполнение IP44 при числе полюсов 2p						Исполнение IP23 при числе полюсов 2p					
		2	4	6	8	10 и 12		2	4	6	8	10	12
Ярмо статора	B_a	1,4 - 1,6						1,45 - 1,6					
Зубцы статора при постоянном сечении (обмотка из круглого провода)	B_{Z1}	1,6 - 1,9						1,8 - 2,05					
Зубцы статора в наиболее узком сечении:								1,7 - 1,95					
при полукруглых пазах	B_{Z1max}	1,75 - 1,95						1,9 - 2,1					
при открытых пазах	B_{Z1max}	1,6 - 1,9						1,7 - 2					
Ярмо ротора:													
короткозамкнутого	B_j	$\leq 1,45$						$\leq 1,55$					
фазного	B_j	$\leq 1,4$						$\leq 1,3$					
		$\leq 1,3$						$\leq 1,4$					
Зубцы ротора при постоянном сечении (трапециевидальные пазы)	B_{Z2}	$\leq 1,2$						$\leq 1,3$					
		$\leq 1,15$						$\leq 1,2$					
		1,7 - 1,95						1,75 - 2					
Зубцы ротора в наиболее узком сечении:													
короткозамкнутого	B_{Z2max}	1,5 - 1,7						1,75 - 2					
фазного	B_{Z2max}	1,75 - 2,15						1,9 - 2,2					
		1,6 - 1,9						1,7 - 1,95					
		1,7 - 1,95						1,85 - 2,1					

Примечание. Индукции на участках магнитной цепи в большинстве асинхронных двигателей не отличаются от указанных в таблице более чем на $\pm 5\%$.

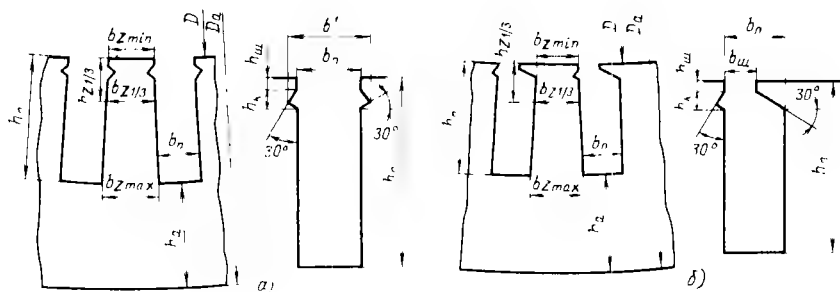


Рис. 8.28. К расчету размеров прямоугольных пазов статора:
а – открытых; б – полуоткрытых

Таблица 8.11. Способы изолирования листов электротехнической стали и коэффициенты заполнения сталью магнитопроводов статора и ротора асинхронных двигателей с номинальным напряжением до 660 В

Высота оси вращения	Статор		Короткозамкнутый ротор		Фазный ротор	
	Способ изолирования листов	k_c	Способ изолирования листов	k_c	Способ изолирования листов	k_c
50–250	Оксидирование	0,97	Оксидирование	0,97	—	—
280–355	Лакировка	0,95	”	0,97	Лакировка	0,95

Значение коэффициента заполнения сердечника сталью следует брать из табл. 8.11.

Размеры паза вначале определяют без учета размеров и числа проводников обмотки, исходя только из допустимых значений индукций в зубцах и ярме статора:

высота паза, м,

$$h_{\text{п}} = \frac{D_a - D}{2} - h_a; \quad (8.31)$$

ширина паза, м,

$$b_{\text{п}} = r_{Z1} - b_{Z1 \text{ min}}, \quad (8.32)$$

или

$$b_{\Pi} = \frac{\pi(D + 2h_{\Pi}/3)}{Z_1} - b_{Z^{1/3}}. \quad (8.33)$$

Обычно $b_{\Pi} \approx (0,4 \div 0,5) t_{Z_1}$.

Предварительно определенная ширина паза b_{Π} используется для выбора размеров обмоточного провода. Ширина проводника b должна быть меньше ширины паза на толщину всей изоляции с учетом допусков, т.е. корпусной, витковой (если она устанавливается в данной конструкции) и проводниковой ($2b_{из}$), а также припусков на сборку сердечников (Δb_{Π} см. ниже):

$$b = b_{\Pi} - \Delta'_{из}, \quad (8.34)$$

где $\Delta'_{из} = 2b_{из} + \Delta b_{\Pi}$.

Все данные по толщине этих видов изоляции берутся из соответствующих таблиц в зависимости от номинального напряжения и мощности машины, конструкции и класса нагревостойкости изоляции (см. гл. 3).

Если эффективный проводник обмотки состоит из двух элементарных проводников, то ширина каждого из них будет равна:

$$b = 0,5(b_{\Pi} - \Delta'_{из}). \quad (8.35)$$

Значения по (8.34) и (8.35) являются предварительными. Окончательная ширина проводника находится по таблице стандартных размеров обмоточных проводов (см. табл. ПЗ.3). Из этой таблицы по предварительно определенной ширине проводника и по его расчетному сечению подбираются наиболее близкие к ним стандартные значения $q_{зл}$ и b и соответствующая им высота проводника a . Высота проводника при этом не должна превышать 2,5-3 мм, так как при большей высоте в проводниках, лежащих друг над другом в одном пазу, начинает проявляться эффект вытеснения тока, вызывающий неравномерное распределение плотности тока по сечению проводников и увеличивающий потери в меди обмотки. Действие этого эффекта возрастает с увеличением числа проводников по высоте паза, поэтому в многovitковых катушках высота проводников не должна превышать указанных пределов, а при малом числе витков она может быть выбрана несколько большей.

Слишком малая высота проводников ($a < 1$ мм) вызывает значительные трудности при изготовлении катушек, так как при изгибе проводников на ребро во время намотки катушек могут произойти разрывы провода или его изоляции.

Нежелательно также применение прямоугольных проводов с близкими размерами a и b , так как в этом случае провод во время намотки катушек часто перекручивается и при растяжке катушек может быть

повреждена его изоляция. Обычно используют провода с отношением размеров $b : a$, близким к 2:1.

После уточнения размеров проводников составляется спецификация паза (таблица заполнения паза) с указанием размеров проводов, названий, размеров и числа слоев изоляционных материалов, различных прокладок и т.п.

Сумма размеров по высоте и ширине паза всех проводников и изоляции с учетом необходимых допусков на разбухание изоляции и на укладку обмотки определяет размеры части паза, занятой обмоткой.

В боковых стенках верхней части открытых пазов выполняют выемки для крепления пазовых клиньев (рис. 8.28). Глубина выемок под клин, высота шлица $h_{ш}$ и высота клиновой части паза $h_{к}$ возрастают с увеличением мощности машины и ширины ее пазов. Обычно в асинхронных двигателях общего назначения $b' - b_{п} = 2 \div 5$ мм, $h_{ш} = 0,5 \div 1,0$ мм и $h_{к} = 3 \div 3,5$ мм в машинах средней мощности и достигает 5 мм в крупных машинах.

Полученные при расчете заполнения паза его размеры являются размерами паза "в свету", т.е. размерами реального паза в собранном шихтованном сердечнике с учетом неизбежной при этом "гребенки", образующейся за счет допусков при штамповке листов и шихтовке магнитопроводов.

Размеры паза "в свету" будут меньше, чем в штампе, т.е. чем размеры паза в каждом отдельном листе после штамповки, на величину припусков, указанных в табл. 8.12.

Поэтому размеры паза в штампе следующие:

$$\left. \begin{aligned} b_{п} &= b'_{п} + \Delta b_{п}; \\ h_{п} &= h'_{п} + \Delta h_{п}, \end{aligned} \right\} \quad (8.36)$$

где $b'_{п}$ и $h'_{п}$ — размеры паза "в свету", полученные при расчете заполнения паза проводниками обмотки и изоляцией.

Таблица 8.12

Высота оси вращения h , мм	Припуски, мм	
	по ширине паза $\Delta b_{п}$	по высоте паза $\Delta h_{п}$
50—132	0,1	0,1
160—250	0,2	0,2
280—355	0,3	0,3
400—500	0,4	0,3

После того как размеры паза в штампе окончательно установлены, определяют расчетные размеры зубцов b_{Zmin} , b_{Zmax} или $b_{Z1/3}$ и h_Z (табл. 8.13).

Обмотку из подразделенных катушек в машинах общего назначения с номинальным напряжением $U_n \leq 660$ В укладывают в полуоткрытые пазы (рис. 8.28, б). Ширина шлица паза $b_{ш}$ выбирается из условия обеспечения свободной укладки полукатушек в паз, поэтому $b_{ш} = 0,5b_n + (1,0 \div 1,5)$ мм. Высоту шлица и высоту клиновой части паза выполняют в пределах $h_{ш} = 0,6 \div 0,8$ мм и $h_k = 2,5 \div 3,5$ мм (большие значения берутся при широких пазах и большей мощности двигателей). Выбор размеров проводников, расчет заполнения паза и определение его размеров "в свету" и в штампе производят так же, как и для открытых пазов. Ширину и расчетную высоту зубцов определяют по формулам табл. 8.13.

Круглые обмоточные провода всыпной обмотки могут быть уложены в пазы произвольной конфигурации, поэтому размеры зубцовой зоны при всыпных обмотках выбирают таким образом, чтобы параллельные грани имели зубцы, а не пазы статора (рис. 8.29). Такие зубцы имеют постоянное, не изменяющееся с высотой зубца поперечное сечение, индукция в них также не изменяется, и магнитное напряжение зубцов с параллельными гранями оказывается меньше, чем магнитное напряжение трапецидальных зубцов, при том же среднем значении индукции в них. Это объясняется отсутствием в зубцах с параллельными гранями участков с высокой индукцией, напряженность поля в которых резко возрастает из-за нелинейности магнитной характеристики стали, увеличивая суммарное магнитное напряжение зубцов.

Таблица 8.13. Расчетные размеры трапецидальных зубцов статора при открытых и полуоткрытых пазах

Размер	Паз по рис. 8.28, а	Паз по рис. 8.28, б
b_{Zmin}	$\frac{\pi D}{Z_1} - b_n$	$\pi \frac{D + 2(h_{ш} + h_k)}{Z_1} - b_n$
b_{Zmax}	$\pi \frac{D + 2h_n}{Z_1} - b_n$	$\pi \frac{D + 2h_n}{Z_1} - b_n$
$b_{Z1/3}$	$\pi \frac{D + \frac{2}{3}h_n}{Z_1} - b_n$	$\pi \frac{D + \frac{2}{3}h_n}{Z_1} - b_n$
h_Z	h_n	h_n

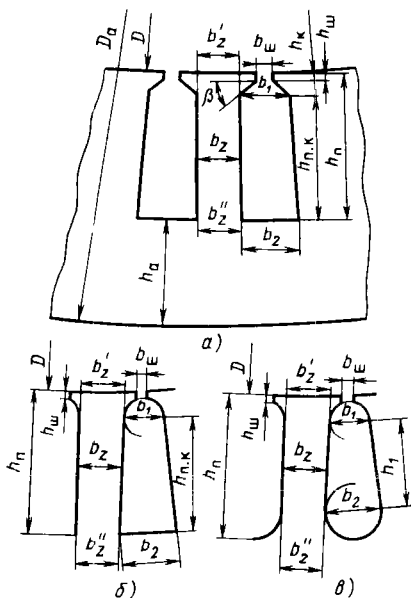


Рис. 8.29. К расчету размеров зубцовой зоны статоров с обмоткой из круглого провода:

а-в — различные конфигурации пазов

Обмотку из круглого провода укладывают в пазы одной из приведенных на рис. 8.29 *а-в* конфигурации. В большинстве современных двигателей, выпускаемых отечественной промышленностью, выполняют трапецидальные пазы (рис. 8.29, *а, б*), хотя лучшее заполнение паза достигается в пазах с овальной нижней частью (рис. 8.29, *в*). Угол накло-

на грани клиновой части в трапецидальных пазах у двигателей с $h \leq 250$ мм обычно $\beta = 45^\circ$, при большей высоте оси вращения $\beta = 30^\circ$.

Принцип расчета размеров паза выпинной обмотки остается таким же, как и для пазов с прямоугольными проводами. Сначала проводят предварительный выбор размеров, исходя из допустимой индукции в зубцах и ярме статора,

$$b_{Z1} = \frac{B_{\delta}^t Z_1 l_{\delta}}{B_{Zcp} l_{ст1} k_c} \quad (8.37)$$

и h_a по (8.28).

В дальнейшем после расчета коэффициента заполнения паза проводниками обмотки полученное значение b_{Z1} уточняется. Требование выполнить зубцы с параллельными гранями накладывает дополнительные условия на возможные соотношения размеров паза. Это вызывает известные трудности расчета зубцовой зоны, который рекомендуется проводить в следующей последовательности (расчетные формулы приведены только для пазов, показанных на рис. 8.29, *а*; для других конфигураций они могут быть легко получены, исходя из условия сохранения постоянства ширины зубцов).

По допустимым индукциям в ярме и зубцах статора (см. табл. 8.10) из (8.28) и (8.37) определяют высоту ярма h_a и ширину зубца b_z статора. Далее находят размеры паза в штампе (рис. 8.29, *а*), м,

$$h_{ш} = 0,5(D_a - D) - h_a; \quad (8.38)$$

$$b_2 = \pi(D + 2h_{ш})/Z_1 - b_{Z1}. \quad (8.39)$$

Размер b_1 определяют в зависимости от угла β :
при $\beta = 45^\circ$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{ш})}{Z_1} - \frac{b_{ш}}{\pi} - \frac{1}{2}b_{Z1}; \quad (8.40)$$

при $\beta = 30^\circ$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{ш})}{Z_1} - \frac{b_{ш}(\sqrt{3})}{\pi\sqrt{3}} - \frac{1}{2}b_{Z1}. \quad (8.41)$$

Полученные размеры округляют до десятых долей миллиметра. Высота шлица паза $h_{ш}$ обычно лежит в пределах от 0,5 до 1 мм в зависимости от мощности двигателя. Следует иметь в виду, что $h_{ш}$ должна быть достаточной для обеспечения механической прочности кромок зубцов, удерживающих в уплотненном состоянии проводники паза после заклиновки пазов. Однако увеличение $h_{ш}$ приводит к возрастанию потока рассеяния паза, что в большинстве случаев нежелательно. Обычно в двигателях с $h \leq 132$ мм принимают $h_{ш} \approx 0,5$ мм, в двигателях с $h_{ш} \geq 160$ мм увеличивают до $h_{ш} = 1$ мм.

Ширину шлица паза в статорах, рассчитанных на укладку обмотки вручную, принимают равной $b_{ш} = d_{из} + (1,5 \div 2)$ мм, где $d_{из}$ - диаметр изолированного обмоточного провода, мм. Размер $b_{ш}$ должен обеспечить возможность свободного пропуска проводников обмотки через шлиц с учетом толщины изоляционных технологических прокладок, устанавливаемых при укладке обмотки для предохранения изоляции проводников от повреждений об острые кромки шлица.

В машинах с однослойной, одно-двухслойной или с двухслойной концентрической обмоткой, в которых укладка обмотки механизирована, ширину шлица паза выполняют несколько большей. При совмещенном методе укладки ширина шлица паза, мм,

$$b_{ш} = d_{из} + (1,8 \div 2,3).$$

При раздельном методе $b_{ш}$ еще более увеличивают в зависимости от размеров штыревой оправки, применяемой для втягивания катушек обмотки в пазы, диаметра провода и коэффициента заполнения паза.

Проектируя серии асинхронных двигателей, размер $b_{ш}$ нормализуют. В сериях 4А и АИ он выполняется равным от 1,8 мм в машинах малой мощности и до 4 мм в более крупных. Средние значения $b_{ш}$ для двигателей при различных h и $2p$ приведены в табл. 8.14.

Таблица 8.14. Средние значения ширины шлица полузакрытых пазов статоров асинхронных двигателей с обмоткой из круглого провода $b_{ш}$, мм

h , мм	Число полюсов двигателя $2p$				
	2	4	6-8	10	12
50 - 63	1,8	1,8	1,8	—	—
71	2	2	2	—	—
80 - 90	3	3	2,7	—	—
100, 112	3,5	3,5	3	—	—
132	4	3,5	3,5	—	—
160 - 250	4	3,7	3,7	—	—
280 - 315	—	—	—	4	4

В клиновой части паза располагают пазовые крышки (в машинах с $h \leq 160$ мм), а в более крупных машинах — пазовые клинья. Поэтому при расчете площади поперечного сечения паза, используемой для размещения обмотки, эти участки не учитывают. Размеры паза, при которых обеспечивается параллельность боковых граней зубцов, могут быть определены также графоаналитическим методом. Его удобно применять, если конфигурация пазов отличается от рассмотренной трапециевидальной, для которой приведены аналитические выражения (8.38) — (8.41). Графоаналитический расчет выполняют в следующей последовательности.

В начале строят равнобедренную трапецию (рис. 8.30, а), верхнее основание которой равно в выбранном масштабе пазовому делению t_{Z1} , нижнее основание $t'_{Z1} = t_{Z1} D_a/D$, а высота $h = (D_a - D)/2$. Такая трапеция представляет собой как бы вырезанный из листа статора сектор пазового деления, в котором должны разместиться паз (ось паза совпадает с осью трапеции), прилегающие к нему с обеих сторон половины

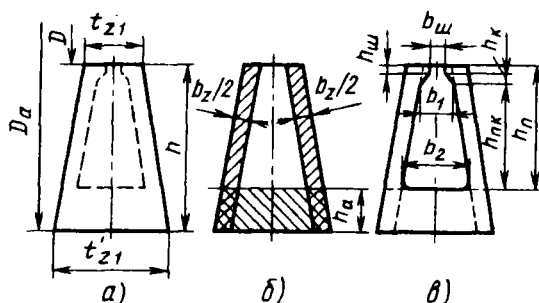


Рис. 8.30. К графоаналитическому методу определения размеров паза статора

сечений зубцов и участок ярма статора. По допустимым индукциям $B_{\Sigma 1}$ и B_a определяют ширину зубца по (8.37) и высоту ярма по (8.28). На построенной трапеции линиями, параллельными ее боковым граням, отсекают участки шириной $0,5 b_{\Sigma 1}$ и линией, параллельной ее основаниям, - участок шириной h_a (рис. 8.30, б). В оставшуюся часть трапеции (рис. 8.30, б - не заштрихована) вписывают контур паза выбранной конфигурации (рис. 8.30, в). Его основные размеры b_1 , b_2 и h_{Π} обеспечивают параллельность боковых граней зубцов при наименьших возможных с точки зрения допустимой индукции размерах зубцов и ярма.

Для достижения достаточной точности построение должно быть выполнено в крупном масштабе, при котором возможна достоверность определения размеров паза с точностью до 0,1 мм, например 10:1 или 5:1.

Для расчета коэффициента заполнения паза необходимо определить площадь паза "в свету" и учесть площадь поперечного сечения паза, занимаемую корпусной изоляцией $S_{из}$ и прокладками в пазу $S_{пр}$. Размеры паза "в свету" определяют с учетом припусков на шихтовку сердечников Δb_{Π} и Δh_{Π} :

$$\left. \begin{aligned} b'_1 &= b_1 + \Delta b_{\Pi}, \\ b'_2 &= b_2 + \Delta b_{\Pi}, \\ h'_{\Pi} &= h_{\Pi} + \Delta h_{\Pi}, \end{aligned} \right\} \quad (8.42)$$

где Δb_{Π} и Δh_{Π} - см. табл. 8.12.

Площадь поперечного сечения трапециевидального паза, в которой размещаются обмотка, корпусная изоляция и прокладки, m^2 ,

$$S'_{\Pi} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_{\Pi.к}, \quad (8.43)$$

где

$$h'_{\Pi.к} = h'_{\Pi} (h_{ш} + h_{к}); \quad (8.44)$$

высота клиновой части паза $h_{к} = (b_1 - b_{ш}) \operatorname{tg} \beta / 2$, т.е.

$$\left. \begin{aligned} h_{к} &= (b_1 - b_{ш}) / 2 \quad \text{при } \beta = 45^\circ \\ \text{и} \\ h_{к} &= (b_1 - b_{ш}) / 2 \sqrt{3} \quad \text{при } \beta = 30^\circ. \end{aligned} \right\} \quad (8.45)$$

Площадь, занимаемая корпусной изоляцией в пазу, m^2 ,

$$S_{из} = b_{из} (2h_{\Pi} + b_1 + b_2), \quad (8.46)$$

где $b_{из}$ – односторонняя толщина изоляции в пазу, м (см. гл. 3).

Площадь, занимаемая прокладками в пазу (на дне паза, под клином и между слоями обмотки в двухслойной обмотке), m^2 ,

$$\left. \begin{aligned} &\text{для двигателей с } h = 180 \div 250 \text{ мм} \\ &S_{пр} = (0,9b_1 + 0,4b_2) \cdot 10^{-3}; \\ &\text{для двигателей с } h \geq 280 \text{ мм} \\ &S_{пр} = 0,6(b_1 + b_2) \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \right\} \quad (8.47)$$

При отсутствии прокладок в пазу $S_{пр} = 0$.

Площадь поперечного сечения паза, остающаяся свободной для размещения проводников обмотки.

$$S'_п = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_{п.к} (S_{из} + S_{пр}). \quad (8.48)$$

Контролем правильности размещения обмотки в пазах является значение коэффициента заполнения паза:

$$k_3 = (d_{из}^2 u_{п} n_{эл}) / S'_п$$

(см. § 3.4), который должен находиться в пределах $k_3 = 0,69 \div 0,71$ для двигателей с $2p = 2$ и $k_3 = 0,72 \div 0,74$ для двигателей с $2p \geq 4$.

Если полученное значение ниже указанных пределов, то площадь паза следует уменьшить за счет увеличения h_a , или b_z , или обоих размеров одновременно в зависимости от принятого при их расчете значения индукции. Индукция в зубцах и ярме статора при этом уменьшится. Уменьшение индукции ниже пределов, указанных в табл. 8.10, показывает, что главные размеры двигателя завышены и активная сталь недоиспользована. В этом случае следует уменьшить длину сердечника или перейти на ближайшую меньшую высоту оси вращения.

Часто расчет показывает, что значение k_3 оказывается выше указанных пределов. Это недопустимо, так как при чрезмерно высоких k_3 проводники обмотки во время укладки приходится очень сильно ушлотнять в пазах. Их изоляция может быть повреждена или, по меньшей мере, ослаблена, что вызовет резкое уменьшение надежности обмотки. Для уменьшения k_3 надо, взяв предельно допустимые значения B_z и B_a (см. табл. 8.10), пересчитать размеры b_z и h_a . К уменьшению k_3 приводит также уменьшение числа элементарных проводников $n_{эл}$, которое возможно при одновременном пропорциональном увеличении площади поперечного сечения $q_{эл}$ или уменьшении числа параллельных ветвей обмотки с тем, чтобы плотность тока осталась неизменной. Если и при этом значение k_3 остается выше допустимого, следует сделать вывод, что принятые главные размеры двигателя занижены. Необходимо просчи-

Таблица 8.15. Расчетные размеры зубцов статоров при трапецидальных или грушевидных пазах в машинах с обмоткой из круглого провода

Размер	Рис. 8.29, а	Рис. 8.29, б	Рис. 8.29, в
b'_Z	$\pi \frac{D + 2(h_{\text{ш}} + h_{\text{к}})}{Z} - b_1$	$\pi \frac{D + 2h_{\text{ш}} + b_1}{Z} - b_1$	$\pi \frac{D + 2h_{\text{ш}} + b_1}{Z} - b_1$
b''_Z	$\pi \frac{D + 2h_{\text{п}}}{Z} - b_2$	$\pi \frac{D + 2h_{\text{п}}}{Z} - b_2$	$\pi \frac{D + 2h_{\text{п}} - b_2}{Z} - b_2$
h_Z	$h_{\text{п}}$	$h_{\text{п}}$	$h_{\text{п}} - 0,1b_2$

тать другой вариант, увеличив l_δ или перейдя на большую высоту оси вращения.

После уточнения размеров паза ширину зубца и расчетную высоту паза определяют по формулам табл. 8.15. Обычно при всыпной обмотке $b_Z = b'_Z = b''_Z$. В некоторых случаях возможно некоторое расхождение значений b'_Z и b''_Z , поэтому рекомендуется рассчитать оба значения b'_Z и b''_Z и при небольшом расхождении результатов взять среднюю расчетную ширину зубца: $b_Z = (b'_Z + b''_Z)/2$. При больших расхождениях следует изменить соотношения размеров пазов либо проводить расчет магнитного напряжения зубцов так же, как при прямоугольных пазах (см. ниже).

8.6. ВЫБОР ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

Правильный выбор воздушного зазора δ во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющее основную часть МДС магнитной цепи всей машины. Поэтому уменьшение зазора приводит к соответственному уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающего тока двигателя, благодаря чему возрастает его $\cos \varphi$ и уменьшаются потери в меди обмотки статора. Но чрезмерное уменьшение δ приводит к возрастанию амплитуды пульсаций индукции в воздушном зазоре и, как следствие этого, к увеличению поверхностных и пульсационных потерь. Поэтому КПД двигателей с очень малыми зазорами не улучшается, а часто даже становится меньше.

В современных асинхронных двигателях зазор выбирают, исходя из минимума суммарных потерь. Так как при увеличении зазора потери в меди возрастают, а поверхностные и пульсационные уменьшаются, то

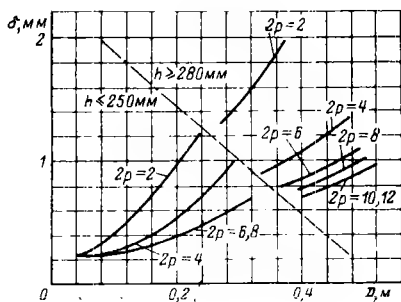


Рис. 8.31. К выбору воздушного зазора асинхронных двигателей

существует оптимальное соотношение между параметрами, при котором сумма потерь будет наименьшей. Такие расчеты проводят на ЭВМ по оптимизационным программам. При учебном проектировании воздушный зазор следует выбирать, руководствуясь данными выпускаемых двигателей (рис. 8.31) либо следующими приближенными формулами.

Для двигателей мощностью менее 20 кВт воздушный зазор, м, равен при $2p = 2$

$$\delta \approx (0,3 + 1,5 D) \cdot 10^{-3}; \quad (8.49)$$

при $2p \geq 4$

$$\delta \approx (0,25 + D) \cdot 10^{-3}. \quad (8.50)$$

Для двигателей средней и большой мощности

$$\delta \approx \frac{D}{1,2} \left(1 + \frac{9}{2p} \right) \cdot 10^{-3}. \quad (8.51)$$

Поверхностные и пульсационные потери в двигателях зависят не только от амплитуд, но и от частоты пульсаций индукции в воздушном зазоре. В быстроходных двигателях частота пульсаций больше, чем в тихоходных, так как она пропорциональна частоте вращения. Для уменьшения этого вида потерь δ в быстроходных двигателях выполняют большим, что уменьшает амплитуду пульсаций.

В статорах высоковольтных машин применяют только открытые пазы, и при малых зазорах это может привести к большим пульсациям индукции, поэтому воздушный зазор в них выполняют большим, обычно равным 1,5–2 мм.

Воздушный зазор, полученный по эмпирическим формулам или из графиков, следует округлять до 0,05 мм при $\delta < 0,5$ мм и до 0,1 мм при $\delta > 0,5$ мм. Например, зазор выбирают равным 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,6 мм и т.д.

Выбранный по приведенным рекомендациям воздушный зазор обычно превышает минимально допустимый по механическим условиям. Однако все же необходимо провести механический расчет вала проектируемого двигателя. Прогиб вала не должен быть больше 10% воздушного зазора.

8.7. РАСЧЕТ РОТОРА

а) Фазные роторы

Для нормальной работы асинхронного двигателя необходимо, чтобы фазная обмотка ротора имела столько же фаз и столько же полюсов, сколько их имеет обмотка статора, т.е. $m_2 = m_1$ и $p_2 = p_1$.

Число пазов ротора Z_2 должно отличаться от числа пазов статора. При расчете задаются обычно числом на полюс и фазу ротора $q_2 = q_1 \pm K$, тогда $Z_2 = Z_1 q_2 / q_1$. В большинстве случаев $K = 1$ или $K = 1/2$. При характерном для обмоток статора асинхронных двигателей целом q_1 обмотка ротора имеет целое или дробное число q_2 со знаменателем дробности, равным 2. Обмотки ротора со знаменателем дробности, большим двух, встречаются редко (в основном в крупных многополюсных машинах).

Число витков в фазе обмотки ротора выбирают, исходя из допустимого напряжения на контактных кольцах при пуске двигателя. ЭДС фазы обмотки ротора E_2 определяется магнитным потоком, который при постоянном уровне индукции в воздушном зазоре растет с увеличением габаритов двигателя. Поэтому в крупных машинах напряжение на контактных кольцах может достигнуть слишком большого значения и привести к перекрытию или пробоя изоляции колец.

Чтобы E_2 не достигала опасного значения, обмотку роторов крупных машин выполняют с малым числом витков в фазе. В современных асинхронных двигателях наиболее распространенной обмоткой такого типа является двухслойная стержневая обмотка, при которой в пазу размещаются только два эффективных проводника. Для уменьшения количества межгрупповых соединений она выполняется волновой.

В отдельных машинах можно встретить и однослойную стержневую обмотку ротора. Она применяется как исключение в крупных машинах специального исполнения, так как требует сложной в технологическом отношении конструкции лобовых частей стержней.

В небольших по габаритам машинах опасности чрезмерного увеличения E_2 нет, так как поток в них невелик, и число витков в фазе обмотки ротора увеличивают, чтобы снизить ток через щеточные контакты, что особенно важно в двигателях с постоянно прилегающими к контактному кольцу щетками. Такие обмотки выполняют из многовитковых катушек. Описание конструкции и схем обмоток фазных роторов дано в гл. 3.

Расчет обмотки фазного ротора проводят в следующей последовательности.

Для определения числа витков в фазе роторов с катушечной обмоткой предварительно задаются ЭДС фазы E_2 , при которой напряжение на контактных кольцах ($U_{к.к}$) в момент пуска двигателя приблизительно равно линейному номинальному напряжению двигателя. Обмотки роторов в большинстве случаев соединяют в звезду, при этом $U_{к.к} =$

$= \sqrt{3}E_2 = 150 \div 250$ В. Если обмотку ротора соединяют в треугольник, то $U_{к.к} = E_2$.

Число витков в фазе

$$w_2 = \frac{E_2}{4k_b k_{об2} f_2 \Phi} = \frac{E_2}{k_E U_{ном}} \frac{f_1}{f_2} w_1 \frac{k_{об1}}{k_{об2}}.$$

Так как E_2 выбрана приближенно и может быть несколько изменена, то, принимая отношение обмоточных коэффициентов $k_{об1}/k_{об2} = 1$ и $k_E = 1$ и учитывая, что при $s = 1$ отношение $f_1/f_2 = 1$, получаем

$$w_2 = \frac{E_2}{U_{ном}} w_1. \quad (8.52)$$

Число эффективных проводников в пазу

$$u_{п2} = \frac{2w_2 m_2}{Z_2} = \frac{w_2}{p_2 q_2} \quad (8.53)$$

должно быть целым и при двухслойной обмотке четным, поэтому полученное значение округляют, после чего уточняют число витков в фазе:

$$w_2 = u_{п2} p_2 q_2. \quad (8.54)$$

В роторах с двухслойной стержневой обмоткой $u_{п2}$ всегда равно двум, поэтому w_2 определяют без предварительного выбора E_2 :

$$w_2 = 2p_2 q_2 = Z_2/m_2. \quad (8.55)$$

После расчета w_2 необходимо проверить напряжение на контактных кольцах ротора:

$$U_{к.к} = \sqrt{3} U_{ном} \frac{w_2}{w_1}. \quad (8.56)$$

В двигателях со стержневой обмоткой ротора $U_{к.к}$ обычно не превышает 800–1000 В, но при расчете двигателей мощностью 1000 кВт и более могут быть получены значения $U_{к.к}$ более 1500–2000 В. Для снижения $U_{к.к}$ в обмотке ротора иногда выполняют две параллельные ветви. При этом необходимо помнить, что стержневая волновая обмотка с $a = 2$ может быть выполнена симметричной только при целом числе q_2 .

Предварительное значение тока в обмотке фазного ротора, А,

$$I_2 = k_i I_1 v_i, \quad (8.57)$$

где k_i — коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания на

отношение I_1/I_2 . Его приближенное значение может быть рассчитано в зависимости от номинального $\cos\varphi$, которым задавались в начале расчета:

$$k_i = 0,2 + 0,8\cos\varphi; \quad (8.58)$$

ν_i - коэффициент приведения токов, для двигателей с фазными роторами

$$\nu_i = \frac{m_1 w_1 k_{061}}{m_2 w_2 k_{062}}. \quad (8.59)$$

Сечение эффективных проводников обмотки ротора, м^2 ,

$$q_{\text{эф}2} = I_2/J_2, \quad (8.60)$$

и при стержневой обмотке $q_c = q_{\text{эф}2}$.

Здесь J_2 допустимая плотность тока, А/м^2 ; в роторах с катушечной обмоткой при классах нагревостойкости изоляции В и F $J_2 = (5 \div 6,5) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$, а в более мощных двигателях со стержневой обмоткой $J_2 = (4,5 \div 5,5) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Эффективные проводники независимо от их размеров на элементарные не подразделяют, так как эффект вытеснения тока в обмотке ротора при номинальных режимах асинхронных двигателей из-за малой частоты ($f_2 = sf_1$) не проявляется.

Окончательные размеры проводников обмотки ротора определяют по таблицам приложения 3 одновременно с расчетом размеров пазов.

В фазных роторах с катушечной обмоткой выполняют прямоугольные открытые пазы, при стержневой обмотке - прямоугольные полузакрытые пазы с узким шлицем (рис. 8.32). Ширину паза выбирают, исходя из примерного соотношения $b_{\text{п}2} = (0,4 \div 0,45) r_{\text{л}2}$. Примеры выполнения изоляции обмоток фазных роторов приведены в табл. 3.10 и 3.11.

При расчете заполнения паза проводниками с изоляцией следует учитывать припуск на сборку магнитопровода (см. табл. 8.12). Высоту

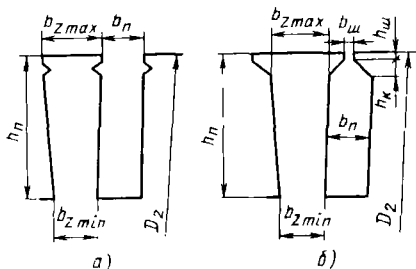


Рис. 8.32. Пазы фазного ротора асинхронного двигателя:

а - открытые (катушечная обмотка); б - полузакрытые (стержневая обмотка)

клиновой части паза при расчете расположения проводников не учитывают. В двигателях с $h = 280 \div 355$ мм выполняют $h_k = 2,5$ мм и $h_{\kappa} = 3,5$ мм при $h = 400$ мм. Ширину шлица обычно принимают равной $b_{\text{ш}} = 1,5$ мм, а высоту $h_{\text{ш}} = 1,0$ мм.

После предварительных расчетов необходимо уточнить размер зубца ротора в наиболее узком сечении b_{Z2min} и проверить соответствие индукции B_{Z2max} ее допустимому значению для данного исполнения двигателя по табл. 8.10:

$$b_{Z2min} = \frac{\pi(D_2 - 2h_{п2})}{Z_2} - b_{п2}; \quad (8.61)$$

$$B_{Z2max} = \frac{B_{\delta}^t Z_2 l_{\delta}}{b_{Z2min} l_{\text{ст}2} k_c}. \quad (8.62)$$

Наибольшая ширина зубца ротора с открытыми пазами (рис. 8.32, а) равна:

$$b_{Z2max} = \frac{\pi D_2}{Z_2} - b_{п2}. \quad (8.63)$$

Наибольшая ширина зубца ротора с полужакрытыми пазами (рис. 8.32, б)

$$b_{Z2max} = \pi \frac{D_2 - 2(h_{\text{ш}} + h_k)}{Z_2} - b_{п2}. \quad (8.64)$$

Расчетная высота зубцов при пазах обеих конфигураций принимается равной высоте паза: $h_{Z2} = h_{Z2}$.

б) Короткозамкнутые роторы

Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей делают по конструкции и технологии изготовления на два типа: сварные и литые.

В сварных конструкциях (рис. 8.33 и 8.34) стержни обмотки устанавливают в пазы, после чего с торцов ротора их замыкают, приваривая или припаявая замыкающие кольца. При литых конструкциях одновременно заливают как одно целое и стержни, и замыкающие кольца. На замыкающих кольцах отливают также вентиляционные лопасти, выполняющие роль вентилятора при работе машины (см. рис. 3.10).

Короткозамкнутые обмотки роторов в отличие от всех других существующих обмоток не имеют определенного числа фаз и числа полюсов*.

*В некоторых специальных машинах встречаются короткозамкнутые роторы с фазной, изолированной от корпуса обмоткой, начала и концы которой замкнуты между собой. Расчет такой обмотки аналогичен расчету обмотки фазного ротора.

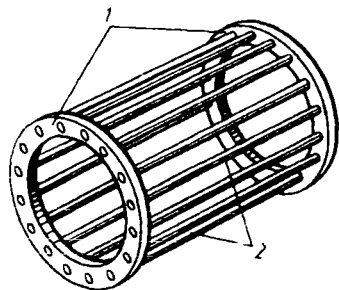
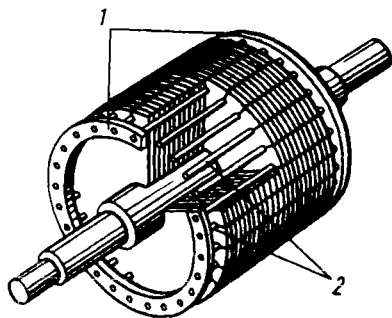


Рис. 8.33. Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя со сварной обмоткой:
1 – замыкающие кольца; 2 – стержни обмотки

Рис. 8.34. Короткозамкнутая обмотка асинхронного двигателя:
1 – замыкающие кольца; 2 – стержни обмотки

Один и тот же ротор может работать в машинах, статоры которых выполнены на различные числа полюсов. Это, в частности, определило возможность использования короткозамкнутых роторов в двигателях с регулированием частоты вращения путем переключения числа полюсов обмотки статора.

Обычно принято считать, что каждый стержень обмотки образует одну фазу короткозамкнутой обмотки. Тогда число ее фаз равно числу пазов ($m_2 = Z_2$) и обмотка каждой из фаз имеет $1/2$ витка, т.е. $w_2 = 1/2$, так как при $m_2 = Z_2$ к каждой фазе относится один стержень с двумя участками замыкающих колец, расположенных с разных торцов ротора (рис. 8.35). Обмоточный коэффициент такой обмотки равен единице, а условное число пазов на полюс и фазу

$$q_2 = \frac{Z_2}{2p_2 m_2} = \frac{1}{2p_2} \quad (8.65)$$

При проектировании зубцовой зоны короткозамкнутых роторов особое внимание следует уделять выбору числа пазов ротора. Это объяс-

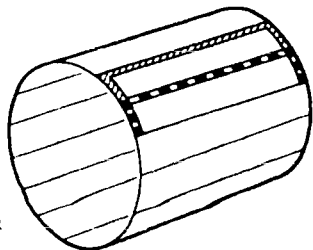


Рис. 8.35. Фазы обмотки короткозамкнутого ротора

няется тем, что в поле воздушного зазора машины кроме основной присутствует целый спектр гармоник более высокого порядка, каждая из которых наводит ЭДС в обмотке ротора, поэтому ток в стержнях обмотки имеет сложный гармонический состав.

В результате взаимодействия токов и полей высших гармоник возникают электромагнитные моменты, которые при неблагоприятном соотношении Z_1 и Z_2 могут существенно ухудшать механическую характеристику двигателя, так как момент на валу машины является суммой моментов, обусловленных всеми взаимодействующими гармониками. В зависимости от соотношения Z_1 и Z_2 в той или иной степени проявляются синхронные или асинхронные моменты от высших гармоник.

Их влияние на момент от первой гармонической приводит к появлению пиков и провалов в результирующей кривой момента.

В поле зазора присутствуют также высшие гармоники, порядок которых определенным образом связан с числами пазов и полюсов машины. Это так называемые зубцовые гармоники, которые вызывают шум и вибрацию при работе двигателя при номинальном режиме. Влияние зубцовых гармоник особенно заметно при малых воздушных зазорах, характерных для асинхронных двигателей небольшой мощности.

Исследования, проведенные для изучения влияния соотношений чисел зубцов на статоре и роторе на кривую момента, а также на шумы и вибрации, позволили определить наилучшие сочетания Z_1 и Z_2 для короткозамкнутых двигателей с различными числами $2p$. Рекомендации по выбору Z_2 при известных Z_1 и $2p$ сведены в табл. 8.16, в которой предлагается несколько возможных вариантов чисел пазов ротора при данных Z и $2p$. В двигателях малой мощности обычно выполняют

Таблица 8.16. Рекомендуемые числа пазов роторов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

$2p$	Число пазов статора	Число пазов ротора	
		без скоса пазов	со скосом пазов
2	12	9*, 15*	—
	18	11*, 12*, 15*, 21*, 22	14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*, (30), 31, 33, 34, 35
	24	15*, (16)*, 17*, 19, 32	18, 20, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	(18), 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45, 47
	42	32, 33, 34, 50, 52	—
4	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59
	12	9*	15*
	18	10*, 14*	18*, 22*
	24	15*, 16*, 17, (32)	16, 18, (20), 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48

Продолжение табл. 8.16

2p	Число пазов статора	Число пазов ротора	
		без скоса пазов	со скосом пазов
4	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, (38), (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (38), (39), 40, (44), 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
	36	26, 46, (48)	28*, 33, 47, 49, 50
6	54	44, 50, 64, 66, 68	42, 43, 51, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
	48,	(34), 36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
8	84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 146	99, 101, 103, 117, 123, 137, 139
10	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	(71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), (109)
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	125, 127, 141, 147, 161, 163

Примечания: 1. В скобках указаны числа пазов, при которых возможно повышенные вибрации двигателей.

2. Звездочкой отмечены числа пазов, применяемые, в основном, в машинах малой мощности.

$Z_2 < Z_1$. Это объясняется рядом причин технологического характера, а также тем, что с увеличением Z_2 ток в стержнях ротора уменьшается и в двигателях небольшой мощности их сечения становятся очень малы. В более крупных двигателях иногда выполняют $Z_2 > Z_1$, с тем чтобы ограничить чрезмерно большой ток в стержнях ротора и увеличить равномерность распределения проводников обмотки по длине расточки.

отсутствуют страницы

308 - 315

отсутствуют страницы

308 - 315

стержня q_c и постоянства ширины зубцов ротора:

$$b_{1н} = \frac{\pi(D_2 - 2h'_{ш} - 2h_B)}{Z_2 + \pi} Z_2 b_{Z2н}, \quad (8.86)$$

где $b_{Z2н}$ — ширина зубца на нижнем участке, определяемая по допустимой индукции в зубцах ротора (см. табл. 8.10); $h'_{ш}$ — высота перемычки над пазом. Для двигателей с $2p = 2$ принимают $h'_{ш} = 1 \div 2$ мм.

Ширина верхней части стержня

$$b_B = (0,5 \div 0,65) b_{1н}. \quad (8.87)$$

Требуемое сечение нижней части стержня

$$q_{с.н} = q_c - q_{с.в}, \quad (8.88)$$

где сечение верхней части стержня

$$q_{с.в} = b_B (h_B - 0,11 b_B). \quad (8.89)$$

Диаметр закругления нижней части стержня

$$b_{2н} = \sqrt{\frac{b_{1н}^2 \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4q_{с.н}}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} \quad (8.90)$$

Наименьший допустимый размер $b_{2н} = 3 \div 4$ мм.

Если по (8.90) $b_{2н} < 3$ мм, следует или уменьшить сечение стержня (увеличить плотность тока в нем), или несколько увеличить индукцию в зубцах ротора.

Расстояние между центрами закруглений нижней части стержня

$$h_{1н} = (b_{1н} - b_{2н}) \frac{Z_2}{2\pi}. \quad (8.91)$$

После округления полученных размеров до десятых долей миллиметра уточняют площадь сечения стержня ротора: $q_{с.в}$ по (8.89) и

$$q_{с.н} = \frac{\pi}{8} (b_{1н}^2 + b_{2н}^2) + (b_{1н} + b_{2н}) \frac{h_{1н}}{2}; \quad (8.92)$$

$$q_c = q_{с.в} + q_{с.н}. \quad (8.93)$$

Размеры зубцов в верхних и нижних частях рассчитывают отдельно.

Размеры верхней части зубца:

$$b_{ZBmax} = \pi \frac{D_2 - (2h'_{ш} + b_B)}{Z_2} - b_B; \quad (8.94)$$

$$b_{ZBmin} = \pi \frac{D_2 - 2h'_B}{Z_2} - b_B, \quad (8.95)$$

где $h'_B = h_B + h'_{ш}$.

Размеры нижней части зубца:

$$b'_{ZH} = \pi \frac{D_2 - 2h'_B - b_{1H}}{Z_2} - b_{1H}; \quad (8.96)$$

$$b''_{ZH} = \pi \frac{D_2 - (2h_H - b_{2H})}{Z_2} - b_{2H}. \quad (8.97)$$

Расчетная высота участков зубца:
верхнего

$$h_{ZB} = h'_B; \quad (8.98)$$

нижнего

$$h_{ZH} = h_H - 0,1b_{2H}. \quad (8.99)$$

В короткозамкнутых роторах с обмоткой из вставных алюминиевых шин выполняют открытые прямоугольные пазы (рис. 8.42). Размеры паза находят, исходя из допустимой ширины зубца b_{Z2min} , определенной по допустимой B_{Z2max} (см. табл. 8.10). Ширина паза

$$b_{п} = \frac{(t_{Z2} - b_{Z2min}) \pm \sqrt{(t_{Z2} - b_{Z2min})^2 - S_{п2} \frac{8\pi}{Z_2}}}{2}, \quad (8.100)$$

где $S_{п2}$ — полная площадь поперечного сечения паза, которую предварительно берут равной:

$$S_{п2} \approx 1,1q_c.$$

Из двух возможных значений $b_{п}$, полученных по (8.100), следует выбрать значение, удовлетворяющее требованиям конструкции. Ширина алюминиевой шины должна быть меньше ширины паза в штампе на припуск на сборку сердечника $\Delta b_{п}$ (см. табл. 8.12). Размеры паза окон-

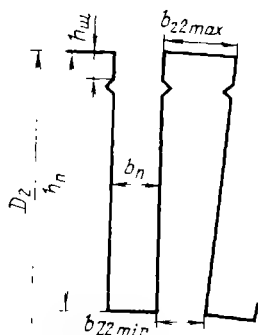


Рис. 8.42. Характерные размеры зубцовой зоны короткозамкнутого ротора с обмоткой из вставных прямоугольных алюминиевых шин

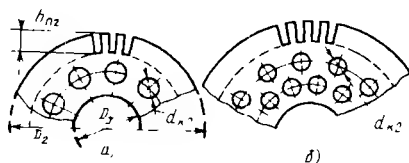


Рис. 8.43. Аксиальные вентиляционные каналы в сердечнике ротора:

a — расположение каналов в один ряд ($m_{K2} = 1$); *б* — расположение каналов в два ряда ($m_{K2} = 2$)

чательно определяют после выбора стандартного сечения и размеров алюминиевой шины (табл. ПЗ.7).

Высота паза

$$h_{II} = h_c + \Delta h_{II} + h_{ш}, \quad (8.101)$$

где Δh_{II} определяют по табл. 8.12; $h_{ш}$ — высота шлица, в роторах такой конструкции выполняется равной 4 мм;

высота стержня

$$h_c = q_c / b_c.$$

Наибольшая и наименьшая ширины зубцов при прямоугольных пазах ротора определяются по (8.61) и (8.63). Расчетная высота зубца принимается равной высоте паза:

$$h_z = h_{II}.$$

в) Сердечники роторов

Сердечники роторов асинхронных двигателей при $D_2 < 990$ мм выполняют с непосредственной посадкой на вал без промежуточной втулки. В двигателях с высотой оси вращения $h \leq 250$ мм применяют посадку сердечников на гладкий вал без шпонки. В двигателях больших размеров сердечники крепят на валу с помощью шпонки. Если диаметр ротора превышает 990 мм, то сердечник шихтуют из отдельных сегментов (см. гл. 11) и крепят на втулке ротора или на продольных ребрах, приваренных к валу (оребранные валы).

В большинстве двигателей с высотой оси вращения $h \geq 250$ мм выполняют аксиальные каналы в целях некоторого улучшения условий охлаждения ротора и снижения его массы и момента инерции.

Аксиальные каналы (рис. 8.43) могут быть расположены в одном ряду ($m_{к2} = 1$) или при больших диаметрах ротора в двух рядах ($m_{к2} = 2$). Число аксиальных каналов в сердечнике ротора обычно колеблется от 9 до 12, а их диаметр ($d_{к2}$) — в пределах от 15 до 30 мм. Большие диаметры выполняют в роторах двигателей с большим числом полюсов. При расположении каналов в два ряда их диаметры уменьшают.

Радиальные каналы в сердечнике ротора, так же как и в статоре, выполняют лишь при длине сердечника, превышающей 0,25 — 0,3 м. В таких роторах необходимо предусматривать также и выполнение аксиальных каналов, которые служат для прохода охлаждающего воздуха к радиальным каналам.

Наличие каналов, их диаметр и расположение оказывают влияние на магнитное напряжение ярма ротора и должны быть учтены при расчете магнитной цепи.

Внутренний диаметр сердечника ротора D_j при непосредственной посадке на вал равен диаметру вала D_v и может быть определен по формуле

$$D_v \approx k_v D_a. \quad (8.102)$$

Значения коэффициента k_v даны в табл. 8.17.

Таблица 8.17

h , мм	50-63	71-250	280-355	400-500
$2p$	2-6	2-8	2	4-12
k_v	0.19	0.23	0.22	0.23

Если сердечник ротора насажен на втулку или оребренный вал, то внутренний диаметр D_j , м, определяется, исходя из допустимой индукции в ярме ротора (см. § 8.8) с использованием следующих выражений:

$$h_j = \Phi / (2B_j l_{ст2} k_c);$$

$$D_j = D_2 - 2(h_{н2} + h_j).$$

8.8. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи проводят для режима холостого хода двигателей, при котором для асинхронных машин характерно относительно сильное насыщение стали зубцов статора и ротора. Как отмечено в гл. 4,

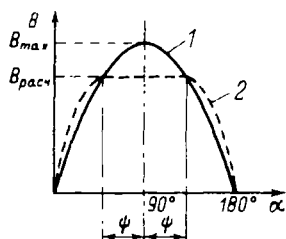


Рис. 8.44. Распределение индукции в воздушном зазоре асинхронного двигателя:

1 – ненасыщенного (синусоидальная кривая);
2 – насыщенного (уплощенная кривая)

насыщение зубцовых зон приводит к уплощению кривой поля в воздушном зазоре (рис. 8.44). Пересечение реальной (уплощенной) кривой поля 2 в зазоре с основной гармонической 1 происходит в точках, отстоящих от оси симметрии одного полупериода кривой на угол $\psi \approx 35^\circ$. Поэтому за расчетную индукцию принимается не амплитудное значение, а $B_{расч} = B_{max} \cos \psi \approx B_{max} \cos 35^\circ \approx 0,82 B_{max}$. По $B_{расч}$ следует определить $H_{расч}$ по основной кривой намагничивания и увеличить затем результат в $k = 1/0,82$ раз, приведя напряженность к амплитудному значению индукции. Для воздушного зазора, имеющего линейную зависимость $H = f(B)$, эта операция равносильна непосредственному определению магнитного напряжения зазора по B_δ . При определении магнитных напряжений участков магнитной цепи с нелинейными магнитными характеристиками влияние уплощения учитывается специальными кривыми намагничивания для зубцов и ярм асинхронных двигателей, построенными по основной кривой намагничивания с учетом указанных зависимостей. При этом принимают

$$\alpha_\delta = 2/\pi \approx 0,637 \text{ и } k_B = \pi/(2\sqrt{2}) \approx 1,11.$$

Марку электротехнической стали рекомендуется выбирать в зависимости от высоты оси вращения проектируемого асинхронного двигателя:

Марка стали	Высота оси вращения, мм
2013	45 ~ 250
2212	160 ~ 250
2214	71 ~ 250
2312	280 ~ 355
2412	280 ~ 560

Расчет магнитной цепи проводится в следующей последовательности.

а) Магнитное напряжение воздушного зазора

Магнитное напряжение воздушного зазора, как и всех последующих участков магнитной цепи, рекомендуется проводить на два полюса машины, т.е. вдоль замкнутой силовой линии потока полюса. Возможен также расчет на один полюс, при этом полученные по расчетным форму-

лам данного параграфа магнитные напряжения участков цепи F_i необходимо уменьшить в 2 раза, а при определении намагничивающего тока (см. ниже) суммарное магнитное напряжение всей цепи соответственно увеличить в 2 раза. Окончательный результат от этого не меняется.

Магнитное напряжение воздушного зазора, А,

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_{\delta} \delta k_{\delta}, \quad (8.103)$$

где B_{δ} — индукция в воздушном зазоре, Тл, рассчитанная по (8.23) по окончательно принятому числу витков в фазе обмотки w_1 и обмоточному коэффициенту $k_{об1}$, определенному для принятой в машине обмотки; δ — воздушный зазор, м; k_{δ} — коэффициент воздушного зазора, рассчитанный по (4.15) или (4.16); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

б) Магнитное напряжение зубцовой зоны статора

Общая формула для расчета магнитного напряжения зубцовой зоны статора

$$F_{Z1} = 2h_{Z1}H_{Z1}, \quad (8.104)$$

где h_{Z1} — расчетная высота зубца статора, м; H_{Z1} — расчетная напряженность поля в зубце, А. Напряженность поля в зубце определяют по кривым намагничивания для зубцов принятой при проектировании марки стали (см. приложения 1 и 2).

Расчетную высоту зубцов h_{Z1} и расчетную напряженность поля H_{Z1} определяют по-разному в зависимости от конфигурации зубцов, связанной с формой пазов статора.

Зубцы с параллельными гранями (в статорах с грушевидными или трапецидальными пазами по рис. 8.29). Индукция в зубце

$$B_{Z1} = \frac{B_{\delta}' Z_1 l_{\delta}}{b_{Z1} l_{ст1} k_{c1}}, \quad (8.105)$$

где b_{Z1} — расчетная ширина зубца, м, определяется по формулам табл. 8.15; если размеры b_{Z1}' и b_{Z1}'' одинаковы, то $b_{Z1} = b_{Z1}' = b_{Z1}''$; если размеры b_{Z1}' и b_{Z1}'' различаются менее чем на 0,5 мм, то $b_{Z1} = 0,5(b_{Z1}' + b_{Z1}'')$. При различии, превышающем 0,5 мм, следует либо скорректировать размеры паза, либо определить расчетную напряженность поля H_{Z1} как для зубцов с изменяющейся площадью поперечного сечения (см. ниже); k_{c1} — коэффициент заполнения сталью сердечника статора (см. табл. 8.11).

Расчетная напряженность поля, А/м, $H_{Z1} = f(B_{Z1})$.

Расчетная высота паза h_{Z1} определяется по табл. 8.15.

Магнитное напряжение зубцовой зоны

$$F_{Z1} = 2h_{Z1}H_{Z1}.$$

Зубцы с изменяющейся площадью поперечного сечения (в статорах с прямоугольными пазами по рис. 8.28). Расчетная высота зубца $h_{Z1} = h_n$. Расчетная напряженность поля

$$H_{Z1} = (H_{Z1max} + 4H_{Z1cp} + H_{Z1min})/6, \quad (8.106)$$

где H_{Z1max} , H_{Z1min} и H_{Z1cp} — напряженности поля в наименьшем, наибольшем и среднем сечениях зубца, определяемые по индукциям в этих сечениях: B_{Z1max} , B_{Z1min} и $B_{Z1cp} = 0,5(B_{Z1max} + B_{Z1min})$.

Индукции B_{Z1max} и B_{Z1min} рассчитывают по (8.105), подставляя в формулу вместо размера b_{Z1} соответственно наименьшее и наибольшее значения ширины зубца, м, рассчитанные по формулам табл. 8.13.

Магнитное напряжение зубцовой зоны, А,

$$F_{Z1} = 2h_{Z1}H_{Z1}. \quad (8.107)$$

Практикуют также определение расчетной напряженности по индукции в поперечном сечении зубца на расстоянии $1/3$ высоты от его наиболее узкой части. В этом случае в (8.105) вместо b_{Z1} подставляют значение $b_{Z1/3}$ (см. табл. 8.13). Расчетная напряженность поля в зубце $H_{Z1} = H_{Z1/3} = fB_{Z1/3}$.

Если индукция в каком-либо одном или в нескольких сечениях зубца окажется больше 1,8 Тл, то необходимо учесть ответвление части потока зубцового деления $\Phi_{tZ} = B\delta t_{Z1}l\delta$ в паз, при котором действительная индукция в зубце уменьшается по сравнению с рассчитанной по (8.105). Метод определения действительной индукции изложен в гл. 4. При его использовании коэффициенты k_n рассчитывают для каждого из сечений зубца, в котором индукция превышает 1,8 Тл, и соответствующего ему по высоте сечения паза. По значению k_n и расчетной индукции определяют действительную индукцию в данном сечении зубца.

В зубцах с параллельными гранями при индукции выше 1,8 Тл коэффициент k_n рассчитывают по соотношению площадей поперечных сечений зубца и паза на середине высоты зубца. В зубцах с изменяющейся площадью поперечного сечения при определении расчетной напряженности по $B_{Z1/3}$ коэффициент k_n рассчитывают по соотношению площадей поперечных сечений зубца и паза на высоте $1/3$ наиболее узкой части зубца. Это приводит к некоторой погрешности в определении расчетной напряженности поля в зубце, но при средних уровнях индукций, характерных для зубцовой зоны статора, эта погрешность не оказывает заметного влияния на результаты расчета.

в) Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора

Расчет магнитного сопротивления зубцовой зоны ротора зависит от формы пазов и типа ротора: фазный ротор или короткозамкнутый с одной обмоткой (беличьей клеткой) или короткозамкнутый ротор с двумя обмотками — рабочей и пусковой (ротор с двойной беличьей клеткой). К последнему типу относят также одноклеточные короткозамкнутые роторы с одной беличьей клеткой, имеющие фигурные пазы — лопаточные или колбообразные, которые при расчете рассматривают как роторы с двойной беличьей клеткой.

Магнитное напряжение зубцовой зоны фазного и короткозамкнутого роторов с одной беличьей клеткой с прямоугольными или с трапециевидальными пазами (по рис. 8.32, а, б; 8.40 и 8.41, а). Общая формула расчета магнитного напряжения

$$F_{Z2} = 2h_{Z2}H_{Z2}, \quad (8.108)$$

где h_{Z2} — расчетная высота зубца (по табл. 8.18), м; H_{Z2} — расчетная напряженность поля в зубце ротора, А/м.

Расчетная напряженность поля H_{Z2} в зубцах с параллельными гранями (см. рис. 8.40, а, б), Тл, определяется в зависимости от индукции в зубце

$$B_{Z2} = \frac{B\delta'_{Z2}l\delta}{b_{Z2}l_{cr2}k_{c2}}, \quad (8.109)$$

где k_{c2} — коэффициент заполнения сердечника ротора сталью (см. табл. 8.11); b_{Z2} — ширина зубца ротора, м, определяется по формулам табл. 8.18.

Если расчеты b'_{Z2} и b''_{Z2} (табл. 8.18) дают одинаковые результаты, то $b_{Z2} = b'_{Z2} = b''_{Z2}$. Если полученные размеры b'_{Z2} и b''_{Z2} различаются менее чем на 0,5 мм, то $b_{Z2} = 0,5(b'_{Z2} + b''_{Z2})$.

При различии, превышающем 0,5 мм, следует либо скорректировать размеры паза с целью уменьшить это различие, либо определить расчетную напряженность поля как для зубцов ротора с изменяющейся площадью поперечного сечения (см. ниже).

Расчетная напряженность поля в зубце

$$H_{Z2} = f(B_{Z2}).$$

Расчетная напряженность поля в зубцах ротора с изменяющейся площадью поперечного сечения (по рис. 8.32; 8.41, а; 8.42). Расчетная напряженность поля определяется как средняя

$$H_{Z2} = (H_{Z2\max} + 4H_{Z2cp} + H_{Z2\min})/6, \quad (8.110)$$

где $H_{Z2\max}$, $H_{Z2\min}$ и H_{Z2cp} — напряженности поля в наибольшем,

Таблица 8.18. Размеры зубцов фазных и короткозамкнутых одноклеточных роторов с прямоугольными и трапециевидными пазами

Размер	Форма пазов ротора по рис.		
	8.32, а; 8.42	8.32, б	8.40, а, б
$b_{Z \max}$	$\frac{\pi D_2}{Z_2} - b_n$	$\pi \frac{D_2 - 2(h_{\text{ш}} + h_{\kappa})}{Z_2} - b_n$	$\pi \frac{D_2 - (2h'_{\text{ш}} + b_1)}{Z_2} - b_1$
$b_{Z \min}$	$\pi \frac{D_2 - 2h_n}{Z_2} - b_n$	$\pi \frac{D_2 - 2h_n}{Z_2} - b_n$	$\pi \frac{D_2 - 2h_n + b_2}{Z_2} - b_2$
$b_{Z 1/3}$	$\pi \frac{D_2 - \frac{4}{3}h_n}{Z_2} - b_n$	$\pi \frac{D_2 - \frac{4}{3}h_n}{Z_2} - b_n$	$b_{Z \min} + \frac{b_{Z \max} + 2b_{Z \min}}{3}$
h_Z	h_n	$h_n - 0,1b_2$	$h_n - 0,1b_2$
b'_Z	-	$\pi \frac{D_2 - 2(h_{\text{ш}} + h'_{\text{ш}}) - b_1}{Z_2} - b_1$	-
b''_Z	-	$\pi \frac{D_2 - 2h_n + b_2}{Z_2} - b_2$	-

наименьшем и среднем сечениях зубца, определяемые по индукциям в этих сечениях зубцов B_{Z2max} , B_{Z2min} и $B_{Z2cp} = 0,5(B_{Z2max} + B_{Z2min})$.

Индукции B_{Z2max} и B_{Z2min} рассчитывают по (8.109), подставляя в эту формулу вместо размера b_{Z2} соответственно наименьшее (b_{Z2min}) и наибольшее (b_{Z2max}) значения ширины зубца, полученные по формулам табл. 8.18.

При расчете магнитного напряжения по напряженности поля в сечении на $1/3$ высоты зубца ротора находят индукцию $B_{Z1/3}$, подставляя в формулу (8.109) вместо b_{Z2} ширину зубца $b_{Z1/3}$ (табл. 8.18). В этом случае расчетная напряженность

$$H_{Z2} = H_{Z1/3} = f(B_{Z1/3}).$$

Если при расчете магнитного напряжения зубцов с переменным сечением $H_{Z2max} > 2H_{Z2min}$, то более точные результаты дает деление зубца по высоте на две равные части и определение средних напряженностей в каждой из них в отдельности. В этом случае расчетная ширина зубца принимается на высоте $1/3$ каждой части, т.е. на высоте, приблизительно равной 0,2 и 0,7 всей высоты паза от его наиболее узкой части:

$$\left. \begin{aligned} b_{Z0,2} &= b_{Z2min} + 0,2(b_{Z2max} - b_{Z2min}); \\ b_{Z0,7} &= b_{Z2min} + 0,7(b_{Z2max} - b_{Z2min}). \end{aligned} \right\} \quad (8.111)$$

Определив индукцию $B_{Z0,2}$ и $B_{Z0,7}$ в этих сечениях зубца, находят соответствующие им напряженности поля $H_{Z0,2}$ и $H_{Z0,7}$.

Магнитное напряжение зубцовой зоны, А, в этом случае

$$F_{Z2} = h_{Z2}(H_{Z0,2} + H_{Z0,7}). \quad (8.112)$$

Необходимо отметить, что для всех сечений зубцов, расчетная индукция в которых превышает 1,8 Тл, необходимо определить действительную индукцию, т.е. учесть уменьшение потока в зубце за счет отвлечения части потока зубцового деления в паз, как это указано в расчете зубцового напряжения зубцовой зоны статора.

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора с фигурными пазами и с двойной беличьей клеткой. При фигурных пазах ротора или двойной беличьей клетке рассчитывают отдельно магнитные напряжения верхней и нижней частей зубцов, А:

$$\left. \begin{aligned} F_{Z2в} &= h_{Z2в} H_{Z2в}; \\ F_{Z2н} &= h_{Z2н} H_{Z2н}. \end{aligned} \right\} \quad (8.113)$$

где $h_{Z2в}$ и $h_{Z2н}$ — расчетные высоты верхней и нижней частей зубца, м,

Таблица 8.19. Размеры зубцов роторов асинхронных двигателей с фигурными пазами

Размер	Форма пазов ротора по рис:		
	8.45, а	8.45, б	8.45, в
$b_{ZB \max}$	$\pi \frac{D_2 - 2h_{\text{ш}}}{Z_2} - b_B$	$\pi \frac{D_2 - (2h_{\text{ш}} + b_B)}{Z_2} - b_B$	$\pi \frac{D_2 - (2h_{\text{ш}} + b_B)}{Z_2} - b_B$
$b_{ZB \min}$	$\pi \frac{D_2 - 2h'_B}{Z_2} - b_B$	$\pi \frac{D_2 - 2h'_B}{Z_2} - b_B$	$\pi \frac{D_2 - 2\left(h_{\text{ш}} + \frac{d}{3}\right)}{Z_2} - 0,94d$
h_{ZB}	h'_B	h'_B	$0,9d + h_{\text{ш}}$
$b_{ZN \max}$	$\pi \frac{D_2 - 2h'_B}{Z_2} - b_H$	$\pi \frac{D_2 - 2h'_B}{Z_2} - b_H =$	$\pi \frac{D_2 - 2\left(h_B + \frac{1}{3}b_H\right)}{Z_2} - 0,94b_H$
$b_{ZN \min}$	$\pi \frac{D_2 - 2h''_B}{Z_2} - b_H$	$= \pi \frac{D_2 - (2h''_B - b_H)}{Z_2} - b_H$	$\pi \frac{D_2 - 2\left(h_B + \frac{1}{3}b_H\right)}{Z_2} - 0,94b_H$
h_{ZN}	h_H	$h_H - 0,1b_H$	$0,9b_H$

определяемые по формулам табл. 8.19 и 8.20; $H_{Z2в}$ и $H_{Z2н}$ — расчетные напряженности верхней и нижней частей зубца, А/м.

Расчет индукции для определения расчетных напряженностей $H_{Z2в}$ и $H_{Z2н}$ проводят по формулам, аналогичным приведенным выше для однозубчатых роторов. Формулы для определения ширины зубцов в различных сечениях приведены в табл. 8.19 и 8.20 в зависимости от конфигурации пазов (рис. 8.45 и 8.46).

Таблица 8.20. Размеры зубцов двойной клетки короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей

Размер	Форма пазов ротора по рис:		
	8.46, а	8.46, б	8.46, в
$b_{Z2.cр}$		$\frac{D_2 - 2\left(h_{ш} + \frac{1}{3}b_B\right)}{Z_2}$	$- 0,94b_B$
h_{ZB}		$0,9b_B + h_{ш}$	
$b_{Zн max}$	—	$\pi \frac{D_2 - 2(h'_B + h_0)}{Z_2} - b_H$	—
$b_{Zн min}$	—	$\pi \frac{D_2 - 2h_H}{Z_2} - b_H$	—
$b_{Zн.cр}$	$\pi \frac{D_2 - 2(h'_B + h_0 + 1/3b_H)}{Z_2} - 0,94b_H$	$\frac{b_{Zн max} + b_{Zн min}}{2}$	$\pi \frac{D_2 - (2h_H - b_{H2})}{Z_2} - b_{H2}$
h_{ZH}	$0,9b_H$	$h'_H - h_0$	$h'_H - h_0 - 0,1b_{H2}$

Магнитное напряжение зубцовой зоны роторов с фигурными пазами или с двойной беличьей клеткой, А/м,

$$F_{Z2} = 2(F_{Z2в} + F_{Z2н}). \quad (8.114)$$

Учет ответвления потока в паз при индукциях выше 1,8 Тл при расчете магнитного напряжения также обязателен, как и при расчете зубцовых зон с другими конфигурациями пазов.

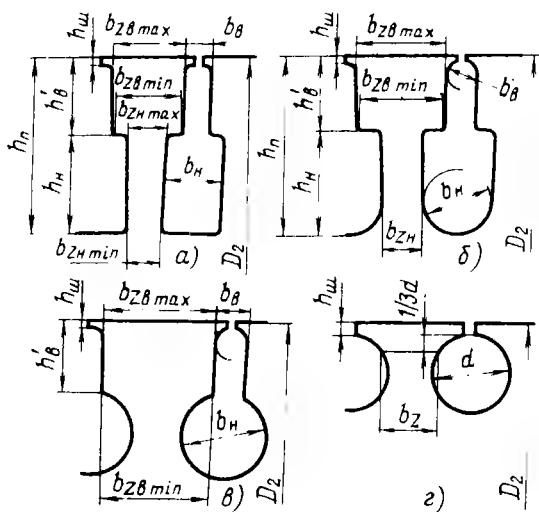


Рис. 8.45. Обозначения размеров зубцовой зоны короткозамкнутых роторов с фигурными пазы:

а-г — различные формы пазов ротора

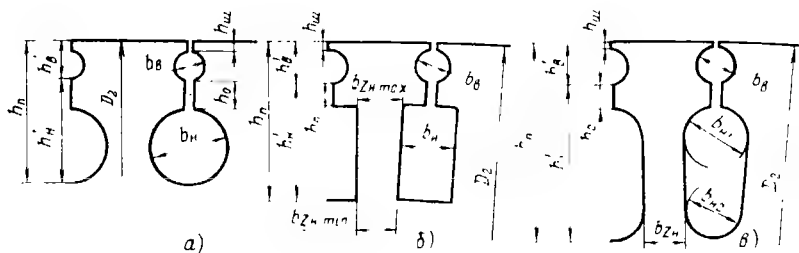


Рис. 8.46. Обозначения размеров зубцовой зоны короткозамкнутых роторов с двойной беличьей клеткой:

а-в — различные конфигурации пазов двухклеточных роторов

После расчета магнитных напряжений F_{δ} , F_{Z1} и F_{Z2} определяют коэффициент насыщения зубцовой зоны:

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} \quad (8.115)$$

Полученное значение k_Z позволяет предварительно оценить правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных про-

ектируемой машины. Если $k_Z > 1,5 \div 1,6$, имеет место чрезмерное насыщение зубцовой зоны; если $k_Z < 1,2$, то зубцовая зона мало использована или воздушный зазор взят слишком большим. В обоих случаях в расчет должны быть внесены соответствующие коррективы.

При дальнейшем расчете магнитной цепи определяют магнитные напряжения ярм статора и ротора.

г) Магнитное напряжение ярм статора и ротора.
Намагничивающий ток

Магнитное напряжение ярма статора, А,

$$F_a = L_a H_a, \quad (8.116)$$

где L_a — длина средней магнитной силовой линии в ярме статора, м;
 H_a — напряженность поля при индукции B_a по кривой намагничивания для ярма, принятой при проектировании стали, А/м.

Индукция в ярме статора, Тл,

$$B_a = \Phi / (2h'_a l_{ст1} k_{c1}), \quad (8.117)$$

где h'_a — расчетная высота ярма статора, м:

$$h'_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{п1} - \frac{2}{3} d_{к1} m_{к1}, \quad (8.118)$$

где $d_{к1}$ и $m_{к1}$ — диаметр и число рядов аксиальных вентиляционных каналов в сердечнике статора; при отсутствии каналов $m_{к1} = 0$.

Длина средней магнитной силовой линии в ярме статора, м,

$$L_a = \pi (D_a - h_a) / (2p), \quad (8.119)$$

где h_a — высота ярма статора, м:

$$h_a = (D_a - D) / 2 - h_{п1}. \quad (8.120)$$

Магнитное напряжение ярма ротора, А,

$$F_j = L_j H_j, \quad (8.121)$$

где H_j — напряженность поля в ярме при индукции B_j по кривой намагничивания для ярма принятой при проектировании стали.

Индукция в ярме ротора, Тл,

$$B_j = \Phi / (2h'_j l_{ст2} k_{c2}), \quad (8.122)$$

где k_{c2} — коэффициент заполнения сталью ярма ротора (табл. 8.11);
 h'_j — расчетная высота ярма ротора, м.

Для роторов с посадкой сердечника на втулку или на оребренный вал (крупные асинхронные двигатели) расчетная высота ярма ротора (см. рис. 8.43), м,

$$h_j' = \frac{D_2 - D_f}{2} - h_{п2} - \frac{2}{3} d_{к2} m_{к2}. \quad (8.123)$$

В двигателях с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал внутренний диаметр ротора равен диаметру вала: $D_j = D_v$. В таких двигателях с $2p = 2$ или 4 учтывают, что часть магнитных силовых линий потока замыкается через вал. Поэтому в двигателях с $2p = 2$ расчетную высоту ярма ротора, м, определяют из выражения

$$h_j' = \frac{2+p}{3,2p} \left(\frac{D_2}{2} - h_{п2} \right) - \frac{2}{3} d_{к2} m_{к2}. \quad (8.124)$$

а длина силовых линий в ярме, м,

$$L_j = 2h_j, \quad (8.125)$$

где высота ярма ротора, м,

$$h_j = (D_2 - D_v)/2 - h_{п2}. \quad (8.126)$$

В двигателях с $2p = 4$ с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал, имеющих размерные соотношения, при которых $0,75 \left(\frac{D_2}{2} - h_{п2} \right) < D_v$, расчетную высоту ярма ротора определяют по (8.124), при других размерных соотношениях — по (8.126).

Длина средней магнитной силовой линии в ярме ротора всех двигателей, кроме двухполюсных, с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал, м,

$$L_j = \pi(D_j + h_j)/(2p), \quad (8.127)$$

где

$$h_j = (D_2 - D_j)/2 - h_{п2}.$$

На этом расчет магнитных напряжений участков магнитной цепи двигателя заканчивается. Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи (на пару полюсов), А,

$$F_{ц} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j. \quad (8.128)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_{\mu} = F_{ц}/F_{\delta}. \quad (8.129)$$

Намагничивающий ток, А,

$$I_{\mu} \approx \frac{pF_{\mu}}{0,9m_1w_1k_{об1}}, \quad (8.130)$$

Намагничивающий ток выражается также в процентах или в долях номинального тока двигателя:

$$I_{\mu}^* = I_{\mu}/I_{ном}. \quad (8.131)$$

Относительное значение I_{μ}^* служит определенным критерием правильности произведенного выбора и расчета размеров и обмотки двигателя. Так, если при проектировании четырехполюсного двигателя средней мощности расчет показал, что $I_{\mu}^* < 0,20 \div 0,18$, то в большинстве случаев это свидетельствует о том, что размеры машины выбраны завышенными и активные материалы недоиспользованы. Такой двигатель может иметь высокие КПД и $\cos \varphi$, но плохие показатели расхода материалов на единицу мощности, большие массу и габариты.

Если же в аналогичном двигателе $I_{\mu}^* > 0,3 \div 0,4$, то это в большинстве случаев означает, что либо его габариты взяты меньшими, чем следовало, либо неправильно выбраны размерные соотношения участков магнитопровода. Двигатель будет иметь низкие КПД и $\cos \varphi$.

В небольших двигателях мощностью менее 2–3 кВт I_{μ}^* может достигать значения 0,5–0,6, несмотря на правильно выбранные размеры и малое насыщение магнитопровода. Это объясняется относительно большим значением магнитного напряжения воздушного зазора, характерным для двигателей малой мощности.

8.9. ПАРАМЕТРЫ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора r_1, x_1 , ротора r_2, x_2 или приведенные к числу витков обмотки статора сопротивления ротора r_2' и x_2' , сопротивление взаимной индуктивности x_{12} и расчетное сопротивление r_{12} (или r_{μ}), введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

Известные из общей теории электрических машин схемы замещения фазы асинхронной машины, основанные на приведении процессов во вращающейся машине к неподвижной, приведены на рис. 8.47. Физические процессы в асинхронной машине наглядно отражает схема, изображенная на рис. 8.47, а. Но для расчета оказалось удобнее преобразовать ее в схему, показанную на рис. 8.47, б.

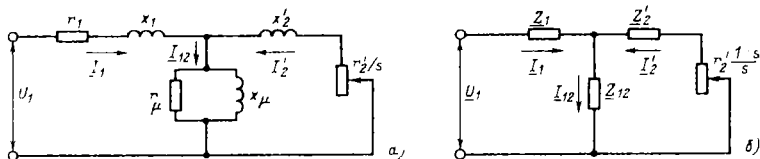


Рис. 8.47. Схемы замещения фазы обмотки приведенной асинхронной машины

Параметры схемы замещения не остаются неизменными при различных режимах работы машины. С увеличением нагрузки увеличивается поток рассеяния, и в связи с этим из-за возрастания насыщения отдельных участков магнитопровода полями рассеяния уменьшаются индуктивные сопротивления x_1 и x_2 .

Увеличение скольжения в двигателях с короткозамкнутым ротором приводит к возрастанию действия эффекта вытеснения тока, что вызывает изменение сопротивлений обмотки ротора r_2 и x_2 . При расчете рабочих режимов машины в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального эти изменения незначительны и ими обычно пренебрегают.

При расчете пусковых режимов, в которых токи машины в несколько раз превышают номинальный, а частота тока в роторе близка к частоте питающей сети, в большинстве случаев приходится учитывать изменение параметров от насыщения участков магнитопровода полями рассеяния и от влияния эффекта вытеснения тока.

Рассмотрим расчет параметров схемы замещения для номинального режима асинхронных машин различных типов.

а) Активные сопротивления обмоток статора и фазного ротора

Активные сопротивления r_1 и r_2 , Ом, определяют по основной расчетной формуле

$$r = k_R \rho_{\vartheta} \frac{L}{q_{\text{эф}} a}, \quad (8.132)$$

где L — общая длина эффективных проводников фазы обмотки, м;
 $q_{\text{эф}}$ — площадь поперечного сечения эффективного проводника, м^2 :

$$q_{\text{эф}} = q_{\text{эл}} n_{\text{эл}}; \quad (8.133)$$

$q_{\text{эл}}$ — площадь поперечного сечения элементарного проводника; $n_{\text{эл}}$ — число элементарных проводников в одном эффективном; a — число параллельных ветвей обмотки; ρ_{ϑ} — удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре, Ом·м; k_R — коэффициент увели-

чения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока.

В проводниках обмотки статора асинхронных машин эффект вытеснения тока проявляется незначительно из-за малых размеров элементарных проводников. Поэтому в расчетах нормальных машин, как правило, принимают $k_R = 1$. Некоторое увеличение потерь, обусловленное действием эффекта вытеснения тока, относят к дополнительным потерям.

В обмотках фазных роторов k_R также принимают равным единице независимо от размеров и числа проводников в пазу, так как частота тока в них при номинальном и близких к нему режимах очень мала.

Общая длина проводников фазы обмотки L , м,

$$L = l_{\text{ср}} w, \quad (8.134)$$

где $l_{\text{ср}}$ — средняя длина витка обмотки, м; w — число витков фазы.

Среднюю длину витка $l_{\text{ср}}$ находят как сумму прямолинейных пазовых и изогнутых лобовых частей катушки:

$$l_{\text{ср}} = 2(l_{\text{п}} + l_{\text{л}}). \quad (8.135)$$

Длина пазовой части $l_{\text{п}}$ равна конструктивной длине сердечников машины:

$$l_{\text{п}} = l_{1(2)}.$$

Лобовая часть катушки имеет сложную конфигурацию (рис. 8.48). Точные расчеты ее длины и длины вылета лобовой части требуют предварительного определения всех размеров катушки и сопряжены со значительными объемами расчетов, данные которых в дальнейшем электромагнитном расчете обычно не используются. Для машин малой и средней мощности и в большинстве случаев для крупных машин достаточно точные для практических расчетов результаты дают эмпирические формулы, учитывающие основные особенности конструктивных форм катушек.

Катушки всыпной обмотки статора.

Длина лобовой части, м,

$$l_{\text{л}} = K_{\text{л}} b_{\text{КТ}} + 2B, \quad (8.136)$$

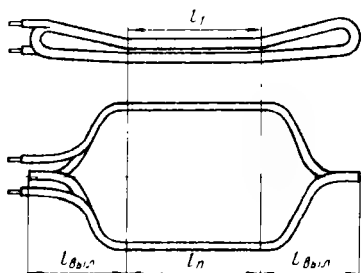


Рис. 8.48. Катушка двухслойной обмотки статора

вылет лобовых частей обмотки, м,

$$l_{\text{выл}} = K_{\text{выл}} b_{\text{кт}} + B. \quad (8.137)$$

В этих формулах $b_{\text{кт}}$ — средняя ширина катушки, м, определяемая по дуге окружности, проходящей по серединам высоты пазов:

$$b_{\text{кт}} = \frac{\pi(D + h_{\text{п1}})}{2p} \beta, \quad (8.138)$$

где $\beta = u_{\text{расч}}/\tau$ — укорочение шага обмотки статора. Для диаметральных двухслойных обмоток, выполненных без укорочения шага, и для однослойных обмоток, включая обмотки из concentрических катушек, имеющих разную ширину, принимают $\beta = 1$; $K_{\text{л}}$ и $K_{\text{выл}}$ — коэффициенты, значения которых берут из табл. 8.21 в зависимости от числа полюсов машины и наличия изоляции в лобовых частях; B — длины вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части, м.

Таблица 8.21. К расчету размеров лобовых частей катушек всыпной обмотки

Число полюсов $2p$	Катушки статора			
	Лобовые части не изолированы		Лобовые части изолированы лентой	
	$K_{\text{л}}$	$K_{\text{выл}}$	$K_{\text{л}}$	$K_{\text{выл}}$
2	1,2	0,26	1,45	0,44
4	1,3	0,4	1,55	0,5
6	1,4	0,5	1,75	0,62
≥ 8	1,5	0,5	1,9	0,72

Для всыпной обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус, берут $B = 0,01$ м. В машинах, обмотки которых укладывают после запрессовки сердечника в корпус, вылет прямолинейной части $B = 0,015$ м.

Катушки из прямоугольного провода. В обмотках статоров и фазных роторов асинхронных двигателей, выполненных из прямоугольного провода, длина лобовой части витка, м,

$$l_{\text{п}} = K_{\text{л}} b_{\text{кт}} + 2B + h_{\text{п}}; \quad (8.139)$$

вылет лобовой части обмотки (рис. 8.49), м,

$$l_{\text{выл}} = K_{\text{выл}} b_{\text{кт}} + B + 0,5h_{\text{п}}, \quad (8.140)$$

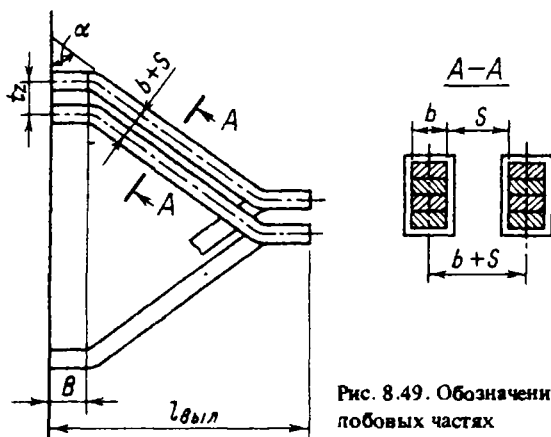


Рис. 8.49. Обозначения размеров катушек в лобовых частях

где $b_{\text{кт}}$ — средняя ширина катушки, для катушек статора рассчитывается по (8.138), для катушек ротора

$$b_{\text{кт}} = \frac{\pi(D_2 - h_{\text{п2}})}{2p} \beta; \quad (8.141)$$

β — укорочение шага обмотки ротора; B — вылет прямолинейной части катушек из паза (по табл. 8.22); $K_{\text{л}}$, $K_{\text{выл}}$ — коэффициенты, определяемые из выражений

$$K_{\text{л}} = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}}; \quad (8.142)$$

$$K_{\text{выл}} = \frac{1}{2} K_{\text{л}} m, \quad (8.143)$$

где (рис. 8.49)

Таблица 8.22. К расчету размеров лобовых частей катушек обмотки из прямоугольного провода

Напряжение U , В	$S, 10^{-3}$ м	$B, 10^{-3}$ м	Напряжение U , В	$S, 10^{-3}$ м	$B, 10^{-3}$ м
≤ 660	3,5	25	6000–6600	6–7	35–50
3000–3300	5–6	35–40	10 000	7–8	60–65

Примечание. Меньшие значения для катушек с непрерывной изоляцией.

$$m = \sin \alpha = (b + S)/t_Z; \quad (8.144)$$

b — ширина меди катушки в лобовой части, м; S — допустимое расстояние между медью проводников соседних катушек (по табл. 8.22), м; t_Z — зубцовое деление, м.

Стержневая волновая обмотка фазных роторов асинхронных двигателей. Длина лобовых частей стержня ротора, м,

$$l_{\text{л}} = K_{\text{л}} b_{\text{кт}} + 2B_{\text{с}}; \quad (8.145)$$

вылет лобовой части, м,

$$l_{\text{выл}} = K_{\text{выл}} b_{\text{кт}} + B_{\text{с}}, \quad (8.146)$$

где $b_{\text{кт}}$ — среднее расстояние между сторонами последовательно соединенных стержней:

$$b_{\text{кт}} = \pi(D_2 - h_{\text{п2}})/2p; \quad (8.147)$$

$B_{\text{с}}$ — сумма прямолинейных участков лобовой части стержня: длины вылета из паза и длины конца стержня в месте установки комутиков, соединяющих стержни друг с другом. Обычно принимают $B_{\text{с}} = 0,05 \div 0,10$ м (большие значения для машин большей мощности и напряжения). Для высоковольтных двигателей мощностью 800 — 1000 кВт и более берут $B_{\text{с}} = 0,12 \div 0,16$ м.

Коэффициенты $K_{\text{л}}$ и $K_{\text{выл}}$ находят соответственно по формулам (8.142) и (8.143), в которых

$$m = (b_{\text{ст}} + S_{\text{ст}})/t_{Z2}, \quad (8.148)$$

где $S_{\text{ст}}$ — расстояние между медью соседних стержней в лобовых частях, м ($S_{\text{ст}}$ принимают в соответствии с табл. 8.23 в зависимости от напряжения на контактных кольцах ротора при неподвижной машине); $b_{\text{ст}}$ — ширина меди стержня ротора, м; t'_{Z2} — зубцовое деление по дну пазов ротора, м:

$$t'_{Z2} = \pi(D_2 - 2h_{\text{п2}})/Z_2. \quad (8.149)$$

Таблица 8.23. К расчету размеров лобовой части стержней фазных роторов асинхронных двигателей

$U_{\text{к.к.}}, \text{В}$	500	500–1000	1000–1500	1500–2000
$S_{\text{ст}}, 10^{-3} \text{ м}$	1,7	2	2,6	2,9

После расчета l_n определяют среднюю длину витка по (8.135) и длину всех стержней фазы обмотки по (8.134).

Активное сопротивление фазы ротора r_2 определяют по (8.132). Для дальнейших расчетов r_2 должно быть приведено к числу витков первичной обмотки

$$r_2' = \nu_{12} r_2, \quad (8.150)$$

где коэффициент приведения сопротивлений обмотки фазного ротора

$$\nu_{12} = \frac{m_1 (w_1 k_{об1})^2}{m_2 (w_2 k_{об2})^2}. \quad (8.151)$$

б) Индуктивные сопротивления обмоток двигателей с фазными роторами

Индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора двигателей с фазными роторами рассчитывают по формуле

$$x = i5,8 \frac{f}{100} \left(\frac{w}{100} \right)^2 \frac{l_\delta'}{pq} (\lambda_n + \lambda_n + \lambda_d), \quad (8.152)$$

в которой расчетная длина l_δ' при наличии радиальных вентиляционных каналов для обмотки статора

$$l_\delta' = l_1 - 0,5 n_k b_k \quad (8.153)$$

и для обмотки ротора

$$l_\delta' = l_2 - 0,5 n_k b_k; \quad (8.154)$$

при отсутствии радиальных каналов в этих формулах $n_k = 0$.

Входящие в (8.152) коэффициенты магнитной проводимости λ_n , λ_n и λ_d обмоток определяют следующим образом.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния рассчитывают по формулам, приведенным в табл. 8.24, в зависимости от конфигурации паза и расположения в нем проводников обмотки (рис. 8.50). В этих формулах значения коэффициентов k_β и k_β' зависят от укорочения шага обмотки β , которое определяют по расчетному шагу обмотки (см. гл. 3) $\beta = y_{расч}/\tau$.

При $\beta = 1$

$$k_\beta = k_\beta' = 1. \quad (8.155)$$

При обмотке с укорочением $2/3 \leq \beta < 1$

$$k_\beta' = 0,25(1 + 3\beta); \quad (8.156)$$

Таблица 8.24. Расчетные формулы для определения коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния обмоток статора и фазного ротора асинхронных двигателей

Рисунок	Тип обмотки	Расчетные формулы
8.50, а	Двух- слойная	$\frac{h_2 - h_0}{3b_{\Pi}} k_{\beta} + \frac{h_{\kappa}}{b_{\Pi}} k'_{\beta} + \frac{h_0}{4b_{\Pi}}$
	Одно- слойная	$\frac{h_2}{3b_{\Pi}} + \frac{h_{\kappa}}{b_{\Pi}}$
8.50, б	Двух- слойная	$\frac{h_2 - h_0}{3b_{\Pi}} k_{\beta} + \left(\frac{h_1}{b_{\Pi}} + \frac{3h_{\kappa}}{b_{\Pi} + 2b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k'_{\beta} + \frac{h_0}{4b_{\Pi}}$
8.50, в, г, з	Двух- слойная и одно- слойная	$\frac{h_2}{3b_1} k_{\beta} + \left(0,785 - \frac{b_{\text{ш}}}{2b_1} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k'_{\beta}$
8.50, д, е, и	То же	$\frac{h_2}{3b_1} k_{\beta} + \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_{\kappa}}{b_1 + 2b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k'_{\beta}$
8.50, ж	Двух- слойная	$\frac{h_2 - h_0}{3b_{\Pi}} k_{\beta} + \left(\frac{h_1}{b_{\Pi}} + \frac{3h_{\kappa}}{b_{\Pi} + 2b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k'_{\beta} + \frac{h_0}{4b_{\Pi}}$

при укорочении $1/3 \leq \beta \leq 2/3$

$$k'_{\beta} = 0,25(6\beta - 1). \quad (8.157)$$

Коэффициент

$$k_{\beta} = 0,25(1 + 3k'_{\beta}). \quad (8.158)$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{\Pi} = 0,34 \frac{q}{l'_{\delta}} (l_{\Pi} - 0,64\beta\tau), \quad (8.159)$$

где q и l_{Π} — число пазов на полюс и фазу и длина лобовой части витка обмотки; $\beta = y_{\text{расч}}/\tau$ — укорочение шага обмотки, для которой проводится расчет, т.е. обмотки статора или фазного ротора.

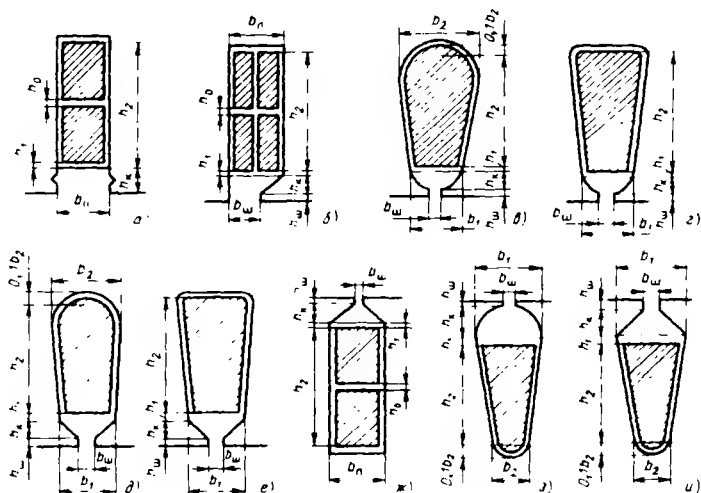


Рис. 8.50. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния фазных обмоток:

a-e — обмотки статора; *ж-и* — обмотки фазного ротора

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния для обмоток статора и фазного ротора

$$\lambda_d = \frac{l_z}{12\delta k_\delta} \xi. \quad (8.160)$$

Значение коэффициента ξ зависит от числа q , укорочения шага обмотки и размерных соотношений зубцовых зон и воздушного зазора.

Ниже приводятся формулы, в которые при расчете ξ для обмоток статора или ротора следует подставлять данные обмоток и зубцовых зон соответственно статора или ротора.

Для обмоток статора и ротора при q , выраженном целым числом ($q \geq 2$), для обмотки с $\beta = 1$

$$\xi = 2 + 0,022q^2 - k_{06}^2(1 + \Delta_Z); \quad (8.161)$$

при укороченном шаге обмотки ($\beta < 1$)

$$\xi = k''q^2 + 2k'_\beta - k_{06}^2(1 + \Delta_Z); \quad (8.162)$$

при дробном ($q \geq 2$)

$$\xi = k''q^2 + 2k''_\beta - k_{06}^2 \left(\frac{1}{d^2} + \Delta_Z \right); \quad (8.163)$$

при дробном q , значение которого $1 < q < 2$,

$$\xi = k'' q^2 + 2k''_{\beta} - \frac{k'}{q} - k_{об} \left(\frac{1}{d^2} + \Delta_Z \right). \quad (8.164)$$

В этих формулах коэффициенты Δ_Z , k' , k'' и k''_{β} определяют по кривым, приведенным на рис. 8.51. Для определения k''_{β} и k' необходимо найти дробную часть числа q , равную c/d (дробное число $q = b + c/d$, где b — целое число, $c/d < 1$ — дробная часть числа q), коэффициент k'_{β} — по (8.156) или (8.157).

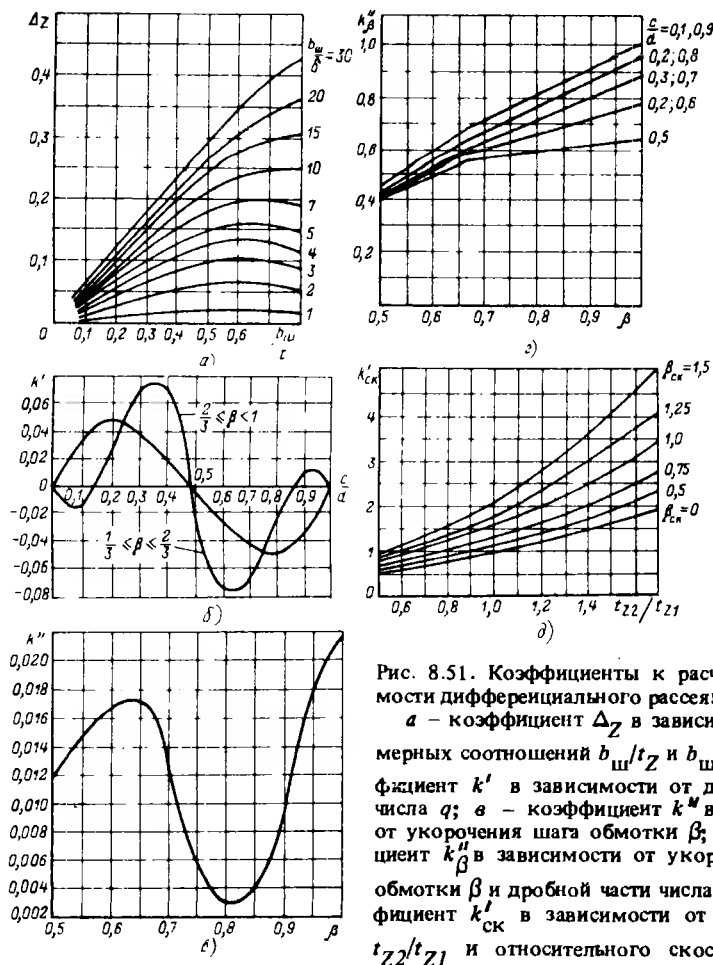


Рис. 8.51. Коэффициенты к расчету проводимости дифференциального рассеяния:

a — коэффициент Δ_Z в зависимости от размерных соотношений $b_w/d\delta$ и $b_w/d\delta$; b — коэффициент k''_{β} в зависимости от дробной части числа q ; c — коэффициент k' в зависимости от дробной части числа q ; d — коэффициент k'' в зависимости от укорочения шага обмотки β ; e — коэффициент k'_{sk} в зависимости от укорочения шага обмотки β и дробной части числа q ; f — коэффициент k'_{sk} в зависимости от соотношения t_{Z2}/t_{Z1} и относительного схода пазов β_{sk} .

Индуктивное сопротивление обмотки фазного ротора, определенное по (8.152), должно быть приведено к числу витков обмотки статора:

$$x_2' = \nu_{12} x_2, \quad (8.165)$$

где ν_{12} — коэффициент приведения сопротивлений по (8.151).

в) Сопротивления обмоток двигателей с короткозамкнутыми роторами

Активное сопротивление фазы обмотки статора двигателя с короткозамкнутым ротором рассчитывается так же, как и для двигателя с фазным ротором.

Активное сопротивление фазы короткозамкнутого ротора определяется следующим образом. Как говорилось выше, за фазу обмотки, выполненной в виде беличьей клетки, принимают один стержень и два участка замыкающих колец (см. рис. 8.35). Токи в стержнях и замыкающих кольцах различны, поэтому их сопротивления при расчете общего сопротивления фазы должны быть приведены к одному току. Таким образом, сопротивление фазы короткозамкнутого ротора r_2 является расчетным параметром, полученным из условия равенства электрических потерь в сопротивлении r_2 от тока I_2 и суммарных потерь в стержне I_c и участках замыкающих колец соответственно от тока в стержне I_c и тока в замыкающем кольце $I_{кл}$ реальной машины:

$$I_2^2 r_2 = I_c^2 r_c + 2 I_{кл}^2 r_{кл}, \quad (8.166)$$

где I_c — ток в стержне ротора; $I_{кл}$ — ток в замыкающих кольцах; r_c — сопротивление стержня; $r_{кл}$ — сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями (см. рис. 8.35).

Ток I_c называют током ротора и в расчетах обозначают I_2 .

Учитывая, что

$$I_{кл} = I_c / \Delta = I_2 / \Delta, \quad (8.167)$$

где $\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{z_2}$ (см. § 8.7), из (8.167) получаем

$$r_2 = r_c + 2 \frac{r_{кл}}{\Delta^2}, \quad (8.168)$$

где

$$r_c = \rho_c \frac{l_c}{q_c} k_r; \quad (8.169)$$

$$r_{\text{кл}} = \rho_{\text{кл}} \frac{\pi D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 q_{\text{кл}}} \quad (8.170)$$

В этих выражениях l_c — полная длина стержня, равная расстоянию между замыкающими кольцами, м; $D_{\text{кл.ср}}$ — средний диаметр замыкающих колец, м (см. рис. 8.37):

$$D_{\text{кл.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}}; \quad (8.171)$$

q_c — сечение стержня, м²; k_r — коэффициент увеличения активного сопротивления стержня от действия эффекта вытеснения тока; при расчете рабочих режимов в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального для всех роторов принимают $k_r = 1$; $q_{\text{кл}}$ — площадь поперечного сечения замыкающего кольца, м²; ρ_c и $\rho_{\text{кл}}$ — соответственно удельные сопротивления материала стержня и замыкающих колец, Ом·м, при расчетной температуре (см. табл. 5.1).

Сопротивление r_2 для дальнейших расчетов должно быть приведено к числу витков первичной обмотки. Выражение коэффициента приведения для сопротивления фазы короткозамкнутого ротора получают, подставляя в (8.151) значения $m_2 = Z_2$, $w_2 = 1/2$, $k_{\text{об2}} = 1$ и учитывая влияние скоса пазов:

$$\nu_{12} = 4m \frac{(w_1 k_{\text{об1}})^2}{Z_2 k_{\text{ск}}^2}, \quad (8.172)$$

где коэффициент скоса пазов по (3.17)

$$k_{\text{ск}} = 2 \sin \frac{\gamma_{\text{ск}}}{2} / \gamma_{\text{ск}};$$

$$\gamma_{\text{ск}} = \pi \frac{2p}{Z_2} \beta_{\text{ск}}.$$

Обычно значения $\beta_{\text{ск}}$ выражают в долях зубцового деления ротора t_{Z_2} . При скосе пазов ротора на одно зубцовое деление статора $\gamma_{\text{ск}} = \pi 2p / Z_1$. В этом случае в двигателях с $2p = 2$ из-за малости угла $\gamma_{\text{ск}}$ принимают $k_{\text{ск}} = 1$.

Приведенное значение активного сопротивления фазы обмотки короткозамкнутого ротора

$$r'_2 = r_2 \nu_{12}. \quad (8.173)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором рассчитывается по той

же формуле, что и для статора с фазными роторами, т.е.

$$x_1 = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} (\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{д}}).$$

Входящий в формулу коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния $\lambda_{\text{п}}$ определяется в зависимости от конфигурации пазов по формулам табл. 8.24.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния $\lambda_{\text{л}}$ определяется по (8.159).

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_{\text{д1}}$ определяют по формуле

$$\lambda_{\text{д1}} = \frac{t_{Z1}}{12\delta k_\beta} \xi, \quad (8.174)$$

в которой ξ находится следующим образом.

При открытых пазах статора и отсутствии скоса статора или ротора

$$\xi = \left(2 \frac{t_{Z2}}{t_{Z1}} - \frac{t_{Z1}}{t_{Z2}} \Delta_Z \right) k_\beta - k_{\text{об}}^2 \left(\frac{t_{Z2}}{t_{Z1}} \right)^2. \quad (8.175)$$

При полузакрытых или полуоткрытых пазах статора с учетом скоса пазов

$$\xi = 2k'_{\text{ск}} k_\beta - k_{\text{об1}}^2 \left(\frac{t_{Z2}}{t_{Z1}} \right)^2 (1 + \beta_{\text{ск}}^2). \quad (8.176)$$

В этих формулах t_{Z1} и t_{Z2} — зубцовые деления статора и ротора; Δ_Z определяют по кривой рис. 8.51,а, k_β определяют по (8.155) или (8.158); $\beta_{\text{ск}} = b_{\text{ск}}/t_{Z2}$ — скос пазов, выраженный в долях зубцового деления ротора. При отсутствии скоса пазов $b_{\text{ск}} = 0$; $k'_{\text{ск}}$ определяют по кривым рис. 8.51,б в зависимости от t_{Z2}/t_{Z1} и $\beta_{\text{ск}}$ (при отсутствии скоса пазов — по кривой, соответствующей $\beta_{\text{ск}} = 0$).

Индуктивное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора определяют по формуле

$$x_2 = 7,9 f_1 l'_\delta 10^{-6} (\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{д}} + \lambda_{\text{ск}}), \quad (8.177)$$

полученной после подстановки в (8.152) значений $m_2 = Z_2$ и $q_2 = 1/(2p)$ обмотки короткозамкнутого ротора и введения дополнительного слагаемого $\lambda_{\text{ск}}$.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора рассчитывается по приведенным в

Таблица 8.25. Расчетные формулы для определения коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутых роторов

Рисунок	Расчетные формулы
8.52, а	$\left[\frac{h_0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b_1} \right] k_{\text{д}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$
8.52, б	$\left(\frac{h_0}{3b_{\text{п}}} + \frac{3h_2}{b_{\text{п}} + 2b_{ш}} \right) k_{\text{д}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$
8.52, в	$\frac{h_0}{3b_{\text{п}}} k_{\text{д}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$
8.52, г	$\left[\frac{h_0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b_1} \right] k_{\text{д}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$
8.52, д	$\left(0,785 - \frac{b_{ш}}{2a_{\text{п}}} \right) k_{\text{д}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$

табл. 8.25 формулам в зависимости от конфигурации паза ротора (рис. 8.52).

При расчете номинального режима двигателя во всех формулах $k_{\text{д}} = 1$.

При закрытых пазах ротора любой конфигурации (рис. 8.52, а–д) в расчетных формулах табл. 8.25 нужно при шлицах по рис. 8.52, е слагаемые $h_{ш}/b_{ш}$ заменить на $0,3 + 1,12 \cdot 10^6 h'_{ш}/I_2$, по рис. 8.52, ж — на $h_{ш}/b_{ш} + 1,12 \cdot 10^6 h'_{ш}/I_2$, где $h'_{ш}$ — толщина ферромагнитной перемычки над пазом, мм; I_2 — ток ротора, А.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния рассчитывают в зависимости от размеров и расположения замыкающих колец обмотки по следующим формулам.

В роторах с литыми обмотками при замыкающих кольцах, прилегающих к торцам сердечника ротора (см. рис. 8.37, б), используют формулу

$$\lambda_{\text{л2}} = \frac{2,3D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 l'_\delta \Delta^2} \lg \frac{4,7D_{\text{кл.ср}}}{h_{\text{кл}} + 2b_{\text{кл}}} \quad (8.178)$$

Если замыкающие кольца отставлены от торцов ротора (см. рис. 8.37, а), как, например, в обмотке, выполненной из медных или ла-

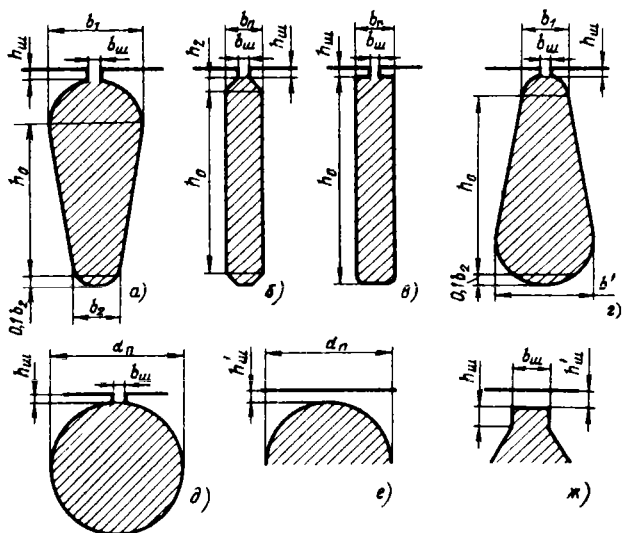


Рис. 8.52. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутых роторов:

а-д — полузакрытые пазы; е, ж — закрытые пазы

тунных стержней, впаянных в замыкающие кольца, расчет проводят по формуле

$$\lambda_{п2} = \frac{2,3D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 l'_\delta \Delta^2} \lg \frac{4,7D_{\text{кл.ср}}}{2(h_{\text{кл}} + b_{\text{кл}})} \quad (8.179)$$

В этих формулах $D_{\text{кл.ср}}$ — средний диаметр замыкающих колец по (8.171); $\Delta = 2 \sin \pi p / Z_2$ — коэффициент приведения токов в кольцо к току в стержне; $h_{\text{кл}}$ и $b_{\text{кл}}$ — средние высота и ширина колец (см. рис. 8.37); l'_δ — по (8.154).

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора

$$\lambda_{п2} = \frac{l'_{Z2}}{12\delta k_\delta} \xi, \quad (8.180)$$

где

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_Z}{1 - (p/Z_2)^2}; \quad (8.181)$$

Δ_Z находят по кривым рис. 8.51, а.

Как видно из (8.181), при большом числе пазов ротора, приходящих на пару полюсов: $Z_2/p \geq 10$, без заметной погрешности можно принять $\xi = 1$.

Коэффициент проводимости скоса, учитывающий влияние на ЭДС обмотки ротора скоса пазов,

$$\lambda_{ск} = (t_{Z2} \beta_{ск}^2) / (12 k_\delta k_\mu), \quad (8.182)$$

где $\beta_{ск}$ — скос пазов, выраженный в зубцовых делениях ротора. При скосе пазов на одно зубцовое деление ротора $\beta_{ск} = 1$; k_μ — коэффициент насыщения магнитной цепи (по 8.129).

Приведенное к числу витков обмотки статора индуктивное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора

$$x'_2 = x_2 \gamma_{12}, \quad (8.183)$$

где γ_{12} — по (8.172).

Сопротивление схемы замещения r_μ (см. рис. 8.47, а) является расчетным. Введением его в схему замещения учитывают влияние потерь в стали статора на процессы в асинхронной машине, поэтому значение сопротивления r_μ должно быть принято таким, чтобы выделяющаяся в нем активная мощность была равна мощности, затрачиваемой на потери в стали в реальной машине и отнесенной к одной фазе. Таким образом, $r_\mu = P_{ст} / (m I_{0a}^2)$, так как активные потери в стали определяются активной составляющей тока холостого хода I_{0a} . Из схемы замещения $r_\mu = E_1^2 m_1 / P_{ст}$, где $E_1 = \underline{U}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_1$.

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора x_μ по схеме замещения может быть определено как $x_\mu = E_1 / I_\mu$.

В расчетной практике параллельное включение сопротивлений r_μ и x_μ оказалось удобнее заменить последовательно включенными сопротивлениями r_{12} и x_{12} (см. рис. 8.47, б), значения которых определяют из условия

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_\mu = \frac{j r_\mu x_\mu}{r_\mu + j x_\mu} = r_{12} + j x_{12},$$

откуда

$$r_{12} = \frac{x_\mu^2 r_\mu}{r_\mu^2 + x_\mu^2} \quad \text{и} \quad x_{12} = \frac{r_\mu^2 x_\mu}{r_\mu^2 + x_\mu^2}$$

Так как в асинхронных машинах $r_\mu \geq x_\mu$, то $x_{12} \approx x_\mu$, а $r_{12} \ll x_{12}$. В связи с этим значение r_{12} не играет заметной роли при анализе процессов в машине, и в расчетах им часто пренебрегают.

Сопротивления r_{12} и x_{12} с достаточной для обычных расчетов точностью определяют по следующим формулам:

$$r_{12} = P_{\text{ст.о.сн}} / (m I_{\mu}^2); \quad (8.184)$$

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{ном}} - I_{\mu} x_1}{I_{\mu}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_{\mu}} - x_1. \quad (8.185)$$

г) Относительные значения параметров

Для удобства сопоставления параметров отдельных машин и упрощения расчета характеристик параметры асинхронных машин выражают в относительных единицах, принимая за базисные значения номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток статора.

Значения параметров, выраженные в относительных единицах, будем отмечать звездочкой:

$$\left. \begin{aligned} x_{1*} &= x_1 \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}; & r_{1*} &= r_1 \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}; \\ x_{12*} &= x_{12} \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}; \\ x_{2*}' &= x_2' \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}; & r_{2*}' &= r_2' \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}; \\ r_{12*} &= r_{12} \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}. \end{aligned} \right\} \quad (8.186)$$

Относительные значения одних и тех же параметров схемы замещения различных асинхронных двигателей нормального исполнения незначительно отличаются друг от друга.

Так, относительные значения индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора большей частью находятся в пределах $x_1 = 0,08 \div 0,14$ и $x_2' = 0,1 \div 0,16$.

Относительные значения сопротивлений взаимной индукции, как правило, в 30–40 раз больше, чем x_{1*} . Обычно $x_{12*} = 2 \div 4$.

Относительные значения активных сопротивлений обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора близки друг к другу и обычно составляют несколько сотых долей: $r_{1*} \approx r_{2*}' \approx 0,02 \div 0,03$; лишь в машинах малой мощности их значения несколько увеличиваются.

Сопротивление r_{12*} обычно составляет 0,05–0,2.

Потери в асинхронных машинах подразделяют на потери в стали (основные и добавочные), электрические, вентиляционные, механические и добавочные при нагрузке.

Основные потери в стали в асинхронных двигателях рассчитывают только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, равная $f_2 = sf_1$, в режимах, близких к номинальному, очень мала и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны.

В пусковых режимах f_2 близка к f_1 и потери в стали ротора соответственно возрастают, однако при расчете пусковых характеристик потери находят только для определения нагрева ротора за время пуска. Наибольшими потерями в пусковых режимах являются электрические потери в обмотках. Они во много раз превышают потери номинального режима, поэтому пренебрежение потерями в стали ротора при больших скольжениях не вносит сколько-нибудь заметной погрешности в расчет.

Основные потери в стали статоров асинхронных машин определяют в соответствии с (6.4) по следующей формуле:

$$P_{\text{ст.осн}} = P_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^{\beta} (k_{\text{да}} B_a^2 m_a + k_{\text{дз}} B_{z\text{ср}}^2 m_{z1}), \quad (8.187)$$

где $P_{1,0/50}$ — удельные потери (табл. 8.26) при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц; β — показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания; для большинства электротехнических сталей $\beta = 1,3 \div 1,5$; $k_{\text{да}}$ и $k_{\text{дз}}$ — коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов. Для машин мощностью меньше 250 кВт приблизительно можно принять $k_{\text{да}} = 1,6$ и $k_{\text{дз}} = 1,8$; для машин большей мощности $k_{\text{да}} = 1,4$ и $k_{\text{дз}} = 1,7$; B_a и $B_{z\text{ср}}$ — индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора, Тл; m_a, m_{z1} — масса стали ярма и зубцов стато-

Таблица 8.26. Удельные потери в стали, Вт/кг, толщиной 0,5 мм при индукции $B = 1$ Тл и частоте перемагничивания $f = 50$ Гц

Марка стали	Удельные потери, Вт/кг	Марка стали	Удельные потери, Вт/кг
2013	2,5	2312	1,75
2212	2,2	2412	1,3
2214	2		

ра, кг:

$$m_a = \pi(D_a - h_a)h_a l_{ст1} k_{c1} \gamma_c; \quad (8.188)$$

$$m_{Z1} = h_{Z1} b_{Z1cp} Z_{1ст1} k_{c1} \gamma_c; \quad (8.189)$$

h_a — высота ярма статора, м:

$$h_a = 0,5(D_a - D) - h_{п1};$$

h_{Z1} — расчетная высота зубца статора, м; b_{Z1cp} — средняя ширина зубца статора, м:

$$b_{Z1cp} = (b_{Z1max} + b_{Z1min})/2;$$

γ_c — удельная масса стали; в расчетах принимают $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

Добавочные потери в стали (добавочные потери холостого хода) подразделяют на поверхностные (потери в поверхностном слое коронки зубцов статора и ротора от пульсаций индукции в воздушном зазоре) и пульсационные потери в стали зубцов (от пульсации индукции в зубцах).

Для определения поверхностных потерь вначале находят амплитуду пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов статора и ротора (рис. 8.53, а), Тл:

$$B_{01(2)} = \beta_{01(2)} k_\delta B_\delta. \quad (8.190)$$

Для зубцов статора β_{01} зависит от отношения ширины шлица пазов ротора к воздушному зазору: $\beta_{01} = f(b_{ш2}/\delta)$; для зубцов ротора — от отношения ширины шлица пазов статора к воздушному зазору: $\beta_{02} = f(b_{ш1}/\delta)$. Зависимость $\beta_0 = f(b_{ш}/\delta)$ приведена на рис. 8.53, б.

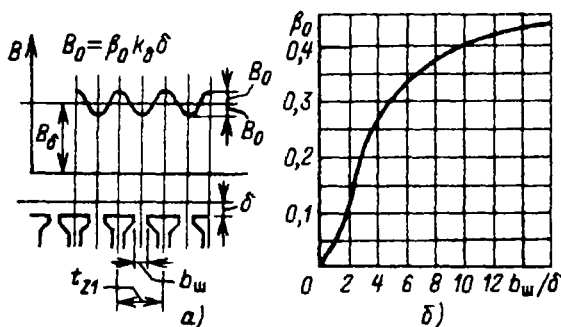


Рис. 8.53. К расчету поверхностных потерь в асинхронных машинах:

а — пульсация индукции в воздушном зазоре; б — зависимость $\beta_0 = f(b_{ш}/\delta)$

По B_0 и частоте пульсаций индукции над зубцами, равной $Z_2 n$ для статора и $Z_1 n$ для ротора, рассчитывают удельные поверхностные потери, т.е. потери, приходящиеся на 1 м^2 поверхности головок зубцов статора и ротора:

для статора

$$p_{\text{пов}1} = 0,5 k_{01} \left(\frac{Z_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{Z_2} \cdot 10^3)^2; \quad (8.191)$$

для ротора

$$p_{\text{пов}2} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{Z_1} \cdot 10^3)^2. \quad (8.192)$$

В этих выражениях $k_{01(2)}$ — коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов статора (ротора) на удельные потери; если поверхность не обрабатывается (двигатели мощностью до 160 кВт, сердечники статоров которых шихтуют на цилиндрические оправки), то $k_{01(2)} = 1,4 \div 1,8$, при шлифованных поверхностях (наружная поверхность роторов машин средней и большой мощности и внутренняя поверхность статора двигателей $P_2 > 160 \text{ кВт}$) $k_{01(2)} = 1,7 \div 2,0$; $n = n_c (1 - s) \approx n_c$ — частота вращения двигателя, об/мин.

Полные поверхностные потери статора, Вт,

$$P_{\text{пов}1} = p_{\text{пов}1} (t_{Z_1} - b_{\text{ш}1}) Z_1 l_{\text{ст}1}. \quad (8.193)$$

Полные поверхностные потери ротора, Вт,

$$P_{\text{пов}2} = p_{\text{пов}2} (t_{Z_2} - b_{\text{ш}2}) Z_2 l_{\text{ст}2}. \quad (8.194)$$

Для определения пульсационных потерь вначале находится амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов $B_{\text{пул}}$, Тл:

для зубцов статора

$$B_{\text{пул}1} \approx \frac{\gamma_2 \delta}{2 t_{Z_1}} B_{Z_1 \text{ср}}; \quad (8.195)$$

для зубцов ротора

$$B_{\text{пул}2} \approx \frac{\gamma_1 \delta}{2 t_{Z_2}} B_{Z_2 \text{ср}}. \quad (8.196)$$

В этих формулах $B_{Z_1 \text{ср}}$ и $B_{Z_2 \text{ср}}$ — средние индукции в зубцах статора и ротора, Тл:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{(b_{ш1}/\delta)^2}{5 + b_{ш1}/\delta}; \\ \gamma_2 &= \frac{(b_{ш2}/\delta)^2}{5 + b_{ш2}/\delta}. \end{aligned} \right\} \quad (8.197)$$

При открытых пазах на статоре или на роторе при определении γ_1 и γ_2 в (8.197) вместо $b_{ш1}$ или $b_{ш2}$ подставляют расчетную ширину раскрытия паза, равную:

$$b'_{ш1(2)} = \frac{b_{ш1(2)}}{3} \left(1 + \frac{0,5 I_{Z1(2)}}{I_{Z1(2)} b_{ш1(2)} + \kappa_\delta} \right) \quad (8.198)$$

(индекс 1 при расчете $b'_{ш1}$, индекс 2 при расчете $b'_{ш2}$).

Значения коэффициента κ_δ в зависимости от отношения b_n/δ для открытых пазов приведены на рис. 8.54.

Пульсационные потери в зубцах статора

$$P_{пул1} \approx 0,11 \left(\frac{Z_2^n}{1000} B_{пул1} \right)^2 m_{Z1}; \quad (8.199)$$

пульсационные потери в зубцах ротора

$$P_{пул2} \approx 0,11 \left(\frac{Z_1^n}{1000} B_{пул2} \right)^2 m_{Z2}. \quad (8.200)$$

В этих формулах m_{Z1} — масса стали зубцов статора, кг, определяется по (8.189); m_{Z2} — масса стали зубцов ротора, кг:

$$m_{Z2} = Z_2 h_{Z2} b_{Z2cp} l_{ст2} k_{c2} \gamma_c, \quad (8.201)$$

где h_{Z2} — расчетная высота зубца ротора, м; b_{Z2cp} — средняя ширина зубца ротора, м:

$$b_{Z2cp} = (b_{Z2max} + b_{Z2min})/2.$$

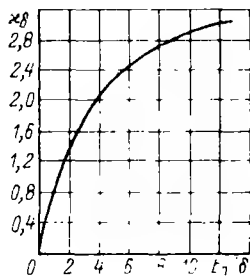


Рис. 8.54. К расчету пульсационных потерь в асинхронных машинах

Поверхностные и пульсационные потери в статорах двигателей с короткозамкнутыми или фазными роторами со стержневой обмоткой обычно очень малы, так как в пазах таких роторов мало $b_{ш2}$ и пульсации индукции в воздушном зазоре над головками зубцов статора незначительны. Поэтому расчет этих потерь в статорах таких двигателей не производят.

В общем случае добавочные потери в стали

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов1}} + P_{\text{пуль1}} + P_{\text{пов2}} + P_{\text{пуль2}} \quad (8.202)$$

и полные потери в стали асинхронных двигателей

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}} \quad (8.203)$$

Обычно $P_{\text{ст.доб}}$ приблизительно в 5–8 раз меньше, чем $P_{\text{ст.осн}}$.

Электрические потери в асинхронных двигателях рассчитывают раздельно в обмотках статоров и роторов.

Электрические потери во всех фазах обмотки статора, Вт,

$$P_{\Sigma 1} = m_1 I_1^2 r_1. \quad (8.204)$$

Электрические потери во всех фазах обмотки фазного ротора, Вт,

$$P_{\Sigma 2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'. \quad (8.205)$$

Электрические потери в обмотке короткозамкнутого ротора, Вт,

$$P_{\Sigma 2} = m_2 I_2^2 r_2 = Z_2 I_2^2 r_2, \quad (8.206)$$

или

$$P_{\Sigma 2} = m_1 I_1'^2 r_2'. \quad (8.207)$$

Электрические потери в щеточном контакте $P_{\Sigma \text{щ}}$, Вт, фазных роторов асинхронных двигателей, не имеющих приспособлений для подъема щеток и замыкания накоротко контактных колец при номинальном режиме работы,

$$P_{\Sigma \text{щ}} = m_2 \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{к.к}}, \quad (8.208)$$

где $\Delta U_{\text{щ}}$ — падение напряжения в скользящем контакте щетка — кольцо, В; принимается в зависимости от марки щеток по табл. П4.2; $I_{\text{к.к}}$ — ток в кольце, А; при соединении обмотки ротора в звезду $I_{\text{к.к}} = I_2$; при соединении обмотки ротора в треугольник (при $m_2 = 3$) $I_{\text{к.к}} = \sqrt{3} I_2$.

Механические и вентиляционные потери. Потери на трение в подшипниках и вентиляционные потери в двигателях с радиальной системой

вентиляции без радиальных вентиляционных каналов, с короткозамкнутым ротором и вентиляционными лопатками на замыкающих кольцах, Вт,

$$P_{\text{мех}} \approx K_T (n/1000)^2 (10D)^3; \quad (8.209)$$

$K_T = 5$ при $2p = 2$; $K_T = 6$ при $2p \geq 4$ для двигателей с $D_a \leq 0,25$ м;
 $K_T = 6$ при $2p = 2$; $K_T = 7$ при $2p \geq 4$ для двигателей с $D_a > 0,25$ м.
 В двигателях с внешним обдувом ($0,1 < D_a \leq 0,5$ м)

$$P_{\text{мех}} = K_T (n/10)^2 D_a^4; \quad (8.210)$$

$K_T = 1$ для двигателей с $2p = 2$ и $K_T = 1,3 (1 - D_a)$ при $2p \geq 4$.

В двигателях с радиальной системой вентиляции средней и большой мощности

$$P_{\text{мех}} = 1,2 \cdot 2p\tau^3 (n_K + 11) \cdot 10^3, \quad (8.211)$$

где n_K — число радиальных вентиляционных каналов; при отсутствии радиальных каналов $n_K = 0$.

В двигателях с аксиальной системой вентиляции

$$P_{\text{мех}} = K_T (n/1000)^2 (10D_{\text{вент}})^3, \quad (8.212)$$

где $D_{\text{вент}}$ — наружный диаметр вентилятора, м; в большинстве конструкций можно принять $D_{\text{вент}} \approx D_a$; $K_T = 2,9$ для двигателей с $D_a \leq 0,25$ м; $K_T = 3,6$ для двигателей с $D_a = 0,25 \div 0,5$ м.

В двигателях большой мощности ($0,5 < D_a < 0,9$ м)

$$P_{\text{мех}} = K_T (10D_a)^3. \quad (8.213)$$

В этом выражении коэффициент K_T принимается по табл. 8.27.

Потери на трение щеток о контактные кольца, Вт, рассчитывают для двигателей с фазными роторами при отсутствии приспособлений для подъема щеток и закорачивания контактных колец в номинальном режиме работы:

$$P_{\text{тр.щ}} = K_{\text{тр}} \rho_{\text{щ}} S_{\text{щ}} v_K, \quad (8.214)$$

Таблица 8.27. К расчету механических потерь двигателей большой мощности

$2p$	2	4	6	8	10	12
K_T	3,65	1,5	0,7	0,35	0,2	0,2

где $K_{тр}$ — коэффициент трения щеток о контактные кольца (обычно принимается равным 0,16–0,17); $p_{щ}$ — давление на контактной поверхности щеток, кПа (см. табл. П4.2); $S_{щ}$ — общая площадь контактной поверхности всех щеток, m^2 ; v_k — линейная скорость поверхности контактных колец, m/c .

Добавочные потери при нагрузке асинхронных двигателей возникают за счет действия потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре, ступенчатости кривых распределения МДС обмоток статора и ротора и ряда других причин. В короткозамкнутых роторах, кроме того, возникают потери от поперечных токов, т.е. токов между стержнями, замыкающихся через листы сердечника ротора. Эти токи особенно заметны при скошенных пазах ротора. В таких двигателях, как показывает опыт эксплуатации, добавочные потери при нагрузке могут достигать 1–2% (а в некоторых случаях даже больше) от подводимой мощности. ГОСТ устанавливает средние расчетные добавочные потери при номинальной нагрузке, равные 0,5% номинальной потребляемой мощности. При расчетах потерь и КПД двигателей в режимах, отличных от номинального, значение добавочных потерь пересчитывают пропорционально квадрату токов:

$$P_{доб} = P_{доб.ном} (I_1 / I_{1ном})^2. \quad (8.215)$$

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = P_2 / P_1 = 1 - \Sigma P / P_1, \quad (8.216)$$

где ΣP — сумма всех потерь в двигателе, Вт.

Ток холостого хода двигателя

$$I_{х.х} = \sqrt{I_{х.х.а}^2 + I_{х.х.р}^2}. \quad (8.217)$$

При определении активной составляющей тока холостого хода принимают, что потери на трение и вентиляцию и потери в стали при холостом ходе двигателя такие же, как и при номинальном режиме. При этом условии

$$I_{х.х.а} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{31х.х}}{m U_{1ном}}. \quad (8.218)$$

Электрические потери в статоре при холостом ходе приближенно принимаются равными:

$$P_{31х.х} = m I_{\mu}^2 r_1. \quad (8.219)$$

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{х.х.р} \approx I_{\mu}. \quad (8.220)$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_{x.x} = I_{x.x.a} / I_{x.x}. \quad (8.221)$$

8.11. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости P_1 , I_1 , $\cos \varphi$, η , $s = f(P_2)$. Часто к ним относят также зависимости $M = f(P_2)$ и I_2 или $I_2' = f(P_2)$.

Методы расчета характеристик базируются на системе уравнений токов и напряжений асинхронной машины, которой соответствует Г-образная схема замещения (рис. 8.55). Г-образная схема получена из Т-образной схемы замещения (см. рис. 8.47), в которой ветвь, содержащая параметр Z_{12} , для удобства расчета вынесена на вход схемы. Т-образная и Г-образная схемы идентичны для данной конкретной ЭДС, для которой рассчитывают комплексный коэффициент $\underline{c}_1$, равный взятому с обратным знаком отношению вектора напряжения фазы $\underline{U}_1$ к вектору ЭДС $-\underline{E}_1$.

В асинхронных двигателях при изменении тока от синхронного холостого хода до номинального $\underline{E}_1$ изменяется незначительно. Поэтому для получения рабочих характеристик коэффициент $\underline{c}_1$ рассчитывают для синхронного холостого хода и принимают его значение неизменным. Это не вносит заметных погрешностей в расчет характеристик, так как значение коэффициента $\underline{c}_1$ во всем диапазоне изменения нагрузки от $P_2 = 0$ до $P_2 = P_{2\text{ном}}$ изменяется лишь в третьем или четвертом знаке.

Корректировку коэффициента $\underline{c}_1$ обычно производят лишь при расчете пусковых характеристик или режимов работы двигателя с большими скольжениями, при которых ток статора существенно превышает номинальный.

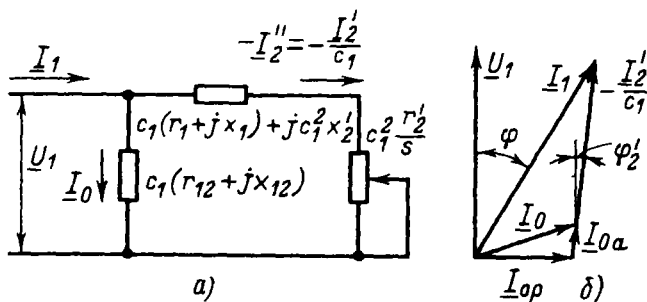


Рис. 8.55. Г-образная схема замещения приведенной асинхронной машины (а) и соответствующая ей векторная диаграмма (б)

Для расчета рабочих характеристик коэффициент $\underline{c}_1$ определяют из выражения

$$\underline{c}_1 = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{12}} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_{12}} = c_1 e^{-j\gamma},$$

где

$$\gamma = \arctg \frac{r_{12} x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12} (r_1 + r_{12}) + x_{12} (x_1 + x_2)}. \quad (8.222)$$

В асинхронных двигателях мощностью более 2–3 кВт, как правило, $|\gamma| \leq 1^\circ$, поэтому реактивной составляющей коэффициента $\underline{c}_1$ можно пренебречь, тогда приближенно

$$\underline{c}_1 \approx c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}}. \quad (8.223)$$

При более точных расчетах определяют и активную, и реактивную составляющие $\underline{c}_1$:

$$\left. \begin{aligned} c_{1a} &= \frac{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}{r_{12}^2 + x_{12}^2}; \\ c_{1p} &= \frac{x_1 r_{12} - r_1 x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} \end{aligned} \right\} \quad (8.224)$$

Полное значение

$$c_1 = \sqrt{c_{1a}^2 + c_{1p}^2}. \quad (8.225)$$

Как видно, выражение (8.223) может быть получено из (8.225) при условии $r_{12} \ll x_{12}$ и $r_1 \ll x_{12}$, что практически всегда имеет место в асинхронных машинах мощностью $P_2 \geq 2 \div 3$ кВт. При этих же условиях $c_{1p} \approx 0$ и $c_{1a} = c_1$.

Рабочие характеристики могут быть рассчитаны с помощью круговой диаграммы или аналитическим методом. Расчет по круговой диаграмме более нагляден, но менее точен, так как требует графических построений, снижающих точность расчета. Аналитический метод более универсален, позволяет учитывать изменение отдельных параметров при различных скольжениях и может быть легко переведен на язык программ при использовании ЭВМ в расчетах.

Аналитический метод расчета. В настоящее время практически все расчеты проводят аналитическим методом. Формулы для расчета рабочих характеристик приведены в табл. 8.28 в удобной для ручного счета последовательности. Расчет характеристик проводят, задаваясь значе-

Таблица 8.28. Формуляр расчета рабочих характеристик асинхронных двигателей

$$P_{\text{ном}} = \dots; 2p = \dots; U_{1\text{ном}} = \dots \text{ В}; I_{1\text{ном}} = \dots \text{ А}; I_{0\text{а}} = \dots \text{ А};$$

$$I_{0\text{р}} \approx T\mu = \dots \text{ А}; P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{тр.щ}} = \dots \text{ кВт};$$

$$P_{\text{э.щ.ном}} = \dots \text{ кВт}; r_1 = \dots \text{ Ом}; r'_2 = \dots \text{ Ом}; c_1 = \dots;$$

$$a' = \dots; a = \dots \text{ Ом}; b' = \dots \text{ Ом}; b = \text{ Ом}$$

№ п/п	Расчетная формула	Едини- ца ве- личи- ны	Скольжение				
			0,005	0,01	0,015	...	$s_{\text{ном}}$
1	$a' r_2' / s$	Ом					
2	$b' r_2' / s$	Ом					
3	$R = a + a' r_2' / s$	Ом					
4	$X = b + b' r_2' / s$	Ом					
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом					
6	$I_2'' = U_{1\text{ном}} / Z$	А					
7	$\cos \varphi_2' = R / Z$	—					
8	$\sin \varphi_2' = X / Z$	—					
9	$I_{1\text{а}} = I_{0\text{а}} + I_2'' \cos \varphi_2'$	А					
10	$I_{1\text{р}} = I_{0\text{р}} + I_2'' \sin \varphi_2'$						
11	$I_1 = \sqrt{I_{1\text{а}}^2 + I_{1\text{р}}^2}$	А					
12	$I_2' = c_1 I_2''$	А					
13	$P_1 = 3 U_{1\text{ном}} I_{1\text{а}} 10^{-3}$	кВт					
14	$P_{\text{э1}} = 3 I_1^2 r_1 10^{-3}$	кВт					
15	$P_{\text{э2}} = 3 I_2'^2 r_2' 10^{-3}$	кВт					
16	$P_{\text{э.щ}} \approx P_{\text{э.щ.ном}} (I_1 / I_{1\text{ном}})^*$	кВт					
17	$P_{\text{доб}} = 0,005 P_1$	кВт					
18	$\Sigma P = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{тр.щ}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} +$ $+ P_{\text{э.щ}} + P_{\text{доб}}$	кВт					
19	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт					
20	$\eta = 1 - \Sigma P / P_1$						
21	$\cos \varphi = I_{1\text{а}} / I_1$						

* Для двигателей с короткозамкнутым ротором $P_{\text{э.щ.ном}} = 0$.

ниями скольжений в диапазоне $s \approx (0,2 \div 1,5)s_{\text{ном}}$. Номинальное скольжение можно предварительно взять $s_{\text{ном}} \approx r'_2$. Для построения характеристик достаточно рассчитать значения требуемых величин для пяти-шести различных скольжений, выбранных в указанном диапазоне примерно через равные интервалы (см. пример расчета).

Перед началом расчета рекомендуется выписать значения постоянных, не зависящих от скольжения величин, как это показано в формуляре и в примере расчета. К таким величинам относятся номинальное напряжение фазы $U_{1\text{ном}}$, сопротивления r_1 и r'_2 , сумма потерь $P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}}$ (для двигателей с фазным ротором также $P_{\text{тр.щ}}$) и составляющие тока синхронного холостого хода: реактивная $I_{\text{ор}} \approx I_\mu$ и активная, которую определяют из выражения

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ст.осн}} + 3I_\mu^2 r_1}{3U_{1\text{ном}}} \quad (8.226)$$

Выписываются также значение коэффициента c_1 , определенное по (8.223) или по (8.225), и расчетные величины, обозначенные в формуляре a , a' , b и b' . Формулы для их определения зависят от принятого (точного или приближенного) метода расчета c_1 .

Если $|\gamma| \leq 1^\circ$, то можно использовать приближенный метод, так как в этом случае $c_{1p} \approx 0$ и $c_1 \approx 1 + x_1/x_{12}$. Тогда

$$\left. \begin{aligned} a' &= c_1^2; & a &= c_1 r_1; \\ b' &= 0; & b &= c_1 (x_1 + c_1 x'_2). \end{aligned} \right\} \quad (8.227)$$

Если же расчет c_1 проводить по уточненным формулам (8.224) и (8.225), то

$$\left. \begin{aligned} a' &= c_{1a}^2 - c_{1p}^2; & a &= c_{1a} r_1 - c_{1p} x_1 - b' x'_2; \\ b' &= 2c_{1a} c_{1p}; & b &= c_{1a} x_1 + c_{1p} r_1 + a' x'_2. \end{aligned} \right\} \quad (8.228)$$

Расчет характеристик рекомендуется проводить в следующей последовательности.

Вначале находят активную и реактивную составляющие комплексного сопротивления правой ветви схемы замещения (см. рис. 8.55):

$$Z_{\text{ветви}} = c_1 (r_1 + jx_1) + jc_1^2 x'_2 + c_1^2 \frac{r'_2}{s} = R + jX,$$

где

$$\left. \begin{aligned} R &= c_1 r_1 + c_1^2 \frac{r_2'}{s}; \\ X &= c_1 x_1 + c_1^2 x_2'. \end{aligned} \right\} \quad (8.229)$$

Из (8.229) с учетом (8.227) или (8.228) получают

$$R = a' \frac{r_2}{s} + a; \quad (8.230)$$

$$X = b; \quad (8.231)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (8.232)$$

Далее находят (см. рис. 8.55)

$$I_2'' = \frac{U_{1\text{ном}}}{Z}, \quad \cos \varphi_2' = R/Z \quad \text{и} \quad \sin \varphi_2' = X/Z.$$

Составляющие тока статора являются суммами активных и реактивных составляющих токов параллельных ветвей схемы замещения:

$$\left. \begin{aligned} I_{1a} &= I_{0a} + I_2'' \cos \varphi_2'; \\ I_{1p} &= I_{0p} + I_2'' \sin \varphi_2'. \end{aligned} \right\} \quad (8.233)$$

Полный ток статора

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}. \quad (8.234)$$

Приведенный ток ротора

$$I_2' = c_1 I_2''. \quad (8.235)$$

Ход последующих расчетов ясен из приведенных в формуляре (табл. 8.28) формул.

После окончания расчета для принятых значений скольжения строится характеристика $s = f(P_2)$, по которой уточняется значение $s_{\text{ном}}$, соответствующее заданной номинальной мощности $P_{2\text{ном}}$ (см. пример расчета на рис. 8.77), и заполняется последний столбец формуляра.

В приведенных формулах не учтено возможное изменение параметров при $s > s_{\text{ном}}$. Поэтому при расчете характеристик двигателей с двухклеточными короткозамкнутыми роторами или с роторами, имеющими фигурные пазы, в которых в повышенной степени проявляется действие эффекта вытеснения тока, для каждого из принятых значений скольжения, больших $s_{\text{ном}}$, необходимо уточнять значения параметров r_2' и x_2' (см. § 8.13).

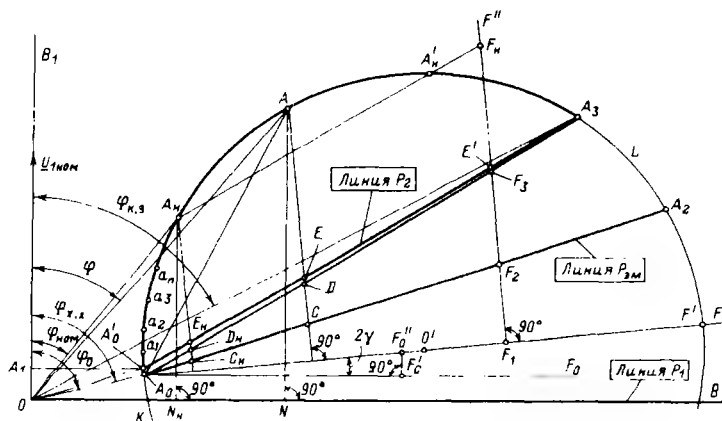


Рис. 8.56. Круговая диаграмма асинхронной машины

Рабочие характеристики асинхронного двигателя мощностью 15 кВт приведены в примере расчета (см. § 8.16).

Расчет рабочих характеристик по круговой диаграмме. Круговая диаграмма асинхронного двигателя изображена на рис. 8.56. Исходными данными для ее построения являются:

ток синхронного холостого хода I_0 , А,

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}, \quad (8.236)$$

где I_{0a} — по (8.226); $I_{0p} \approx I_{\mu}$.

Коэффициент c_1 рассчитывают по (8.223) или по (8.225).

Сопротивления короткого замыкания

$$\left. \begin{aligned} x_{к1} &= x_1 + c_1 x'_2; \\ r_{к1} &= r_1 + c_1 r'_2. \end{aligned} \right\} \quad (8.237)$$

Чтобы размеры круговой диаграммы были удобны для работы, целесообразно вначале выбрать ее диаметр D_k (в пределах 200–250 мм),

после чего рассчитать масштабы: масштаб тока, А/мм: $m_I = \frac{U_{1ном}}{c_1 x_{к1} D_k}$;

масштаб мощности, Вт/мм: $m_P = 3 U_{ном} m_I$; масштаб момента,

Н·м/мм: $m_M = m_P / \Omega$, где $\Omega = \frac{2\pi f_1}{p}$.

При построении диаграммы вектор напряжения $\underline{U}_{1ном}$ направляют по оси ординат OB_1 . Из начала координат строят вектор тока синхрон-

ного холостого хода $OA_0 = \frac{1}{m_I} I_0$ под углом φ_0 к оси ординат $\varphi_0 = \arccos \frac{I_{0a}}{I_0}$. Точку A_0 удобно найти, отложив по вертикальной и горизонтальной осям ее координаты, соответственно равные I_{0a} и I_{0p} .

Через точку A_0 проводят линии $A_0F_0 \parallel OB$ и A_0F под углом 2γ к оси ординат. Из-за малости γ построение угла $\angle F_0A_0F$ удобно выполнять следующим образом. В произвольной точке F'_0 прямой A_0F_0 восстанавливают перпендикуляр к линии A_0F_0 и откладывают на нем отрезок

$$|F'_0F''_0| = |A_0F'_0| \operatorname{tg} 2\gamma \approx |A_0F'_0| 2\operatorname{tg} \gamma;$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{r_{12}x_{12} - r_{12}x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}.$$

Линия A_0F определяет положение диаметра круговой диаграммы. Отложив на ней отрезок $|A_0O'| = 0,5D_k$, проводят окружность с центром O' радиусом $0,5D_k$. Через произвольную точку F_1 диаметра A_0F' проводят линию $(F''F_1) \perp (A_0F)$ и откладывают на ней отрезки

$$|F_1F_2| = |A_0F_1| \frac{r_1}{x_{k1}} \quad \text{и} \quad |F_1F_3| = |A_0F_1| \frac{r_{k1}}{x_{k1}}.$$

Через точку A_0 и точки F_2 и F_3 проводят прямые до пересечения их с окружностью соответственно в точках A_2 и A_3 . На оси ординат откладывают отрезок $|OA_1| = P_0/m_p$, где $P_0 = P_{\text{ст}} + 3I_0^2r_1 + P_{\text{мех}}$, и через точку A_1 проводят $|A_1A'_0| \parallel OB$. Точку A'_0 соединяют с точками O и A_3 . На этом построение круговой диаграммы заканчивается.

Окружность диаметром D_k с центром O' является геометрическим местом концов векторов тока статора двигателя при различных скольжениях. Точка окружности A_0 определяет положение конца вектора тока I_0 при синхронном холостом ходе, а точка A'_0 — при реальном холостом ходе двигателя. Отрезок OA'_0 определяет ток $I_{x,x}$, а угол $\angle A'_0OB_1 = \cos \varphi_{x,x}$. Точка A_3 окружности определяет положение конца вектора тока при коротком замыкании ($s = 1$), отрезок OA_3 — ток $I_{k,3}$, а угол $\angle A_3OB_1 = \cos \varphi_{k,3}$. Точка A_2 определяет положение конца вектора тока при $s = \infty$.

Промежуточные точки на дуге окружности A_0A_3 определяют положение концов векторов тока I_1 при различных нагрузках в двигательном режиме ($0 < s \leq 1$). Ось абсцисс диаграммы OB является линией первичной мощности P_1 . Линией электромагнитной мощности $P_{\text{эм}}$ или электромагнитных моментов $M_{\text{эм}}$ является линия A_0A_2 . Линией полезной мощности на валу (вторичной мощности P_2) является линия

$A'_0 A_3$. По круговой диаграмме для тока статора, которому соответствует точка A на окружности, можно рассчитать необходимые для построения рабочих характеристик данные:

ток статора, A , $I_1 = m_I |OA|$;

ток ротора, A , $I'_2 = m_I |A_0 A|$;

первичную мощность, Вт, $P_1 = m_P |AN|$, где $AN \perp OB$;

электромагнитную мощность, Вт, $P_{эм} = m_P |AC|$, где $AC \perp A_0 F$;

электромагнитный момент $M_{эм} = m_M |AC|$;

полезную мощность, Вт, $P_2 = m_P |AE|$;

КПД $|AE|/|AN|$;

коэффициент мощности $\cos \varphi = \cos \angle AOB_1$;

скольжение двигателя $|DC|/|AC|$.

Для построения рабочих характеристик вначале находят положение на окружности точки A_H , которая соответствует номинальному режиму работы. Для этого, исходя из заданной номинальной мощности $P_{2ном}$, рассчитывают длину отрезка $|E'F_H| = P_{2ном}/m_P$ и откладывают на линии $F_1 F'' \perp A_0 F$ от точки ее пересечения E' с линией полезной мощности $A'_0 A_3$. Через точку F_H проводят $F_H A_H \parallel A'_0 A_3$. Точки пересечения $F_H A_H$ с окружностью A_H и A'_H определяют положение концов вектора тока I_1 при мощности $P_{2ном}$. Точка A_H , ближайшая к A'_0 , соответствует номинальному режиму, точка A'_H — режиму неустойчивой работы двигателя (при $s > s_{кр}$).

Наметив на дуге $A_0 A_H$ несколько точек $a_1, a_2, a_3, \dots$, определяют соответствующие каждой из них данные $I_1, P_1, P_2, \cos \varphi, \eta, M, s$.

Из круговой диаграммы можно найти также приближенное значение кратности максимального момента M_{max} . Оно будет несколько занижено, так же как и в аналитическом расчете без учета изменения параметров от насыщения полями рассеяния и от действия эффекта вытеснения тока.

Расчет рабочих характеристик по круговой диаграмме связан с определенными погрешностями при выполнении графических работ. Некоторое уточнение может дать сочетание графического метода и элементов аналитического. Например, I_1, I_2 и $\cos \varphi$ определяют по круговой диаграмме, а суммы потерь, P_2, P_1, s и η — расчетным путем, используя данные круговой диаграммы. В этом случае можно также учесть дополнительные потери, которые при построении круговой диаграммы не принимают во внимание.

Такая методика расчета иногда применяется на практике. Однако все более широкое распространение ЭВМ делает аналитический метод расчета рабочих характеристик предпочтительным.

8.12. РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Учет эффекта вытеснения тока. Известно, что с увеличением частоты тока в стержнях обмотки короткозамкнутого ротора возникает эффект вытеснения тока, в результате которого плотность тока в верхней части стержней возрастает, а в нижней уменьшается, при этом активное сопротивление ротора увеличивается, а индуктивное уменьшается. Изменение сопротивлений ротора влияет на пусковые характеристики машины.

В большинстве случаев эффект вытеснения тока в обмотках короткозамкнутых роторов играет положительную роль, так как увеличивает начальные моменты двигателей. Это широко используют при проектировании асинхронных машин, выполняя роторы с глубокими прямоугольными или фигурными пазами или с двойной беличьей клеткой, в которых эффект вытеснения тока проявляется особенно сильно. Однако неравномерное распределение плотности тока по сечению стержня ротора может привести и к нежелательным последствиям. Например, при неудачно выбранных размерных соотношениях стержней чрезмерно возрастающая в пусковых режимах плотность тока в их верхних участках может вызвать неравномерное тепловое удлинение стержней и их изгиб. При этом стержни разрывают усики пазов и выгибаются в воздушный зазор, что неизбежно приводит к выходу двигателя из строя. В связи с этим правильный учет влияния эффекта вытеснения тока является необходимым при проектировании асинхронных машин с короткозамкнутыми роторами.

В расчетах оказалось удобнее определять не непосредственно активное и индуктивное сопротивления стержней при неравномерной плотности тока, а их относительные изменения под действием эффекта вытеснения тока. Эти изменения оценивают коэффициентами k_r и k_d . Коэффициент k_r показывает, во сколько раз увеличилось активное сопротивление пазовой части стержня $r_{c\xi}$ при неравномерной плотности тока в нем по сравнению с его сопротивлением r_c при одинаковой плотности по всему сечению стержня:

$$k_r = r_{c\xi} / r_c. \quad (8.238)$$

Коэффициент демпфирования k_d показывает, как уменьшилась магнитная проводимость $\lambda_{п\xi}$ участка паза, занятого проводником с током, при действии эффекта вытеснения тока по сравнению с проводимостью того же участка, но при равномерной плотности тока в стержне $\lambda'_п$:

$$k_d = \lambda'_{п\xi} / \lambda'_п. \quad (8.239)$$

Аналитическими выражениями, определяющими k_r и k_d , полученными для прямоугольных стержней при допущениях о постоянстве удельного сопротивления материала стержня по всей площади его попе-

речного сечения, бесконечности магнитной проницаемости стали магнитопровода и прямолинейности магнитных линий потока рассеяния в пазу, являются

$$\left. \begin{aligned} k_r &= \xi \frac{\operatorname{sh} 2\xi + \sin 2\xi}{\operatorname{ch} 2\xi - \cos 2\xi}; \\ k_d &= \frac{3}{2\xi} \frac{\operatorname{sh} 2\xi - \sin 2\xi}{\operatorname{ch} 2\xi - \cos 2\xi}. \end{aligned} \right\} \quad (8.240)$$

В этих выражениях ξ , так называемая "приведенная высота" стержня, — величина безразмерная, значение которой определяется по формуле

$$\xi = 2\pi h_c \sqrt{\frac{b_c}{b_n} \frac{f_2}{\rho_{сг}}} 10^{-7}, \quad (8.241)$$

где h_c — высота стержня в пазу, м; $h_c = h_n - (h_{ш} + h'_{ш})$; b_c и b_n — ширина стержня и ширина паза, м. При расчете роторов со вставными стержнями принимают $b_c = 0,9b_n$; в роторах с литой обмоткой $b_c = b_n$; f_2 — частота тока в роторе в расчетном режиме, Гц; $\rho_{сг}$ — удельное сопротивление материала стержня при расчетной температуре, Ом · м.

Для двигателей общего назначения с медными вставными стержнями короткозамкнутого ротора при расчетной температуре 75 °С ($\rho_{с75} = 10^{-6}/47$ Ом · м, см. табл. 5.1) из (8.241) имеем

$$\xi = 96,32 h_c \sqrt{s} \sqrt{\frac{b_c}{b_n}}. \quad (8.242)$$

При расчетной температуре 115 °С ($\rho_{с115} = 10^{-6}/41$ Ом · м)

$$\xi = 89,96 h_c \sqrt{s} \sqrt{\frac{b_c}{b_n}}. \quad (8.243)$$

При литой алюминиевой обмотке ротора при расчетных температурах 75 °С ($\rho_{с75} = 10^{-6}/21,5$ Ом · м) и 115 °С ($\rho_{с115} = 10^{-6}/20,5$ Ом · м) соответственно имеем

$$\xi = 65,15 h_c \sqrt{s} \quad (8.244)$$

и

$$\xi = 63,61 h_c \sqrt{s}. \quad (8.245)$$

Анализ зависимостей (8.240) показывает, что при $\xi \leq 1$ эффект вытеснения тока практически не влияет на сопротивления стержней. Это является критерием необходимости его учета при проектировании.

В расчетах условно принимают, что при действии эффекта вытеснения ток ротора распределен равномерно, но не по всему сечению стержня, а лишь по его верхней части, ограниченной высотой h_r , имеющей сечение q_r и сопротивление $r_{c\xi} = r_c q_c / q_r$; h_r называют глубиной проникновения тока в стержень. Для прямоугольных стержней $h_r = h_c / k_r$.

При определении $\lambda_{п\xi}$ аналогично принимают, что ток равномерно распределен по верхней части сечения стержня высотой h_x .

В практических расчетах для определения k_r и k_d пользуются не аналитическими зависимостями (8.240), а построенными на их основе кривыми $\varphi(\xi)$ и $\varphi'(\xi)$ (рис. 8.57 и 8.58). Принятые при выводе (8.240) допущения приводят к положению, что на глубину проникновения не влияют высота и конфигурация стержня. Это позволяет использовать (8.240) и кривые $\varphi(\xi)$ и $\varphi'(\xi)$ для определения k_r и k_d в стержнях различных конфигураций. Расчет проводят в следующей последовательности. По полной высоте стержня, частоте тока и удельному сопротивлению материала стержня из табл. 5.1 по (8.241) определяют функцию ξ , в соответствии с которой по кривым рис. 8.57 находят функцию φ , а по кривым рис. 8.58 — функцию φ' .

Далее определяют глубину проникновения тока

$$h_r = h_c / (1 + \varphi) \quad (8.246)$$

и коэффициент $k_d = \varphi'$.

Коэффициент k_r находят по отношению площадей всего сечения стержня и сечения, ограниченного высотой h_r , т.е.

$$k_r = q_c / q_r. \quad (8.247)$$

По значениям k_r и k_d можно найти сопротивление пазовой части стержня обмотки ротора и коэффициент магнитной проводимости участка паза ротора, занятого стержнем с током:

$$r_{c\xi} = k_r r_c; \quad (8.248)$$

$$\lambda'_{п\xi} = k_d \lambda'_{п}. \quad (8.249)$$

Для определения k_r в стержнях некоторых наиболее распространенных конфигураций используют заранее полученные расчетные формулы

Для прямоугольных стержней (рис. 8.59, а)

$$k_r = q_c / q_r = h_c / h_r = 1 + \varphi. \quad (8.250)$$

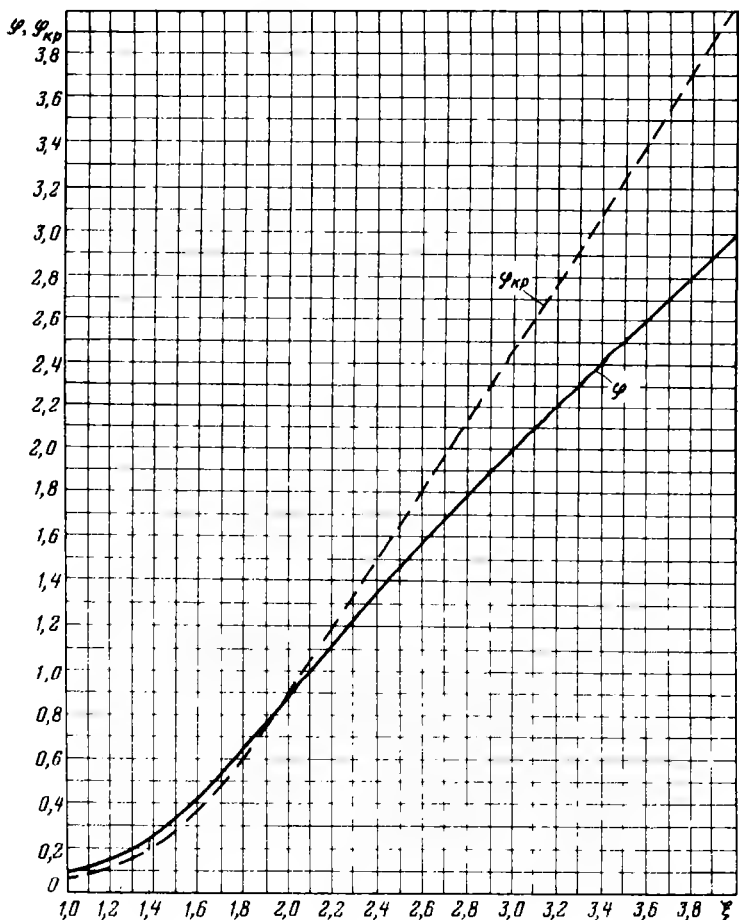


Рис. 8.57. Кривые φ и $\varphi_{кр}$ в функции "приведенной высоты" ξ ($\varphi \approx \xi - 1$ при $\xi > 4$ и $\varphi = 0,089\xi^4$ при $\xi < 1$)

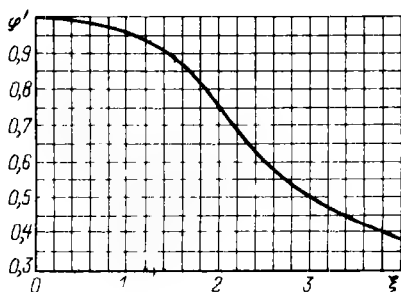


Рис. 8.58. Зависимость φ' от "приведенной высоты" ξ ; при $\xi > 4$ $\varphi' = 3/2\xi$

Для круглых стержней (рис. 8.59, б)

$$k_r = q_c/q_r = 1 + \varphi_{кр}. \quad (8.251)$$

Функция $\varphi_{кр}$ для круглого стержня представлена на рис. 8.57. Для грушевидных стержней (рис. 8.59, в)

$$\left. \begin{aligned} k_r &= q_c/q_r; \\ \text{здесь} \quad q_c &= \frac{\pi(b_1^2 + b_2^2)}{8} + \frac{b_1 + b_2}{2} h_1. \end{aligned} \right\} \quad (8.252)$$

Площадь сечения q_r при $\frac{b_1}{2} \leq h_r \leq h_1 + \frac{b_1}{2}$

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right), \quad (8.253)$$

где

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right);$$

$$h_r = h_c / (1 + \varphi).$$

При $h_r \leq b_1/2$ площадь

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{4(\varphi_{кр} + 1)}. \quad (8.254)$$

При $h_r > h_1 + b_1/2$ принимают $q_r \approx q_c$ и $k_r = 1$.

Для трапециевидных стержней с узкой верхней частью (см. рис. 8.59, г)

$$k_r = q_c/q_r,$$

q_c определяют по (8.252). Площадь q_r при $h_r \leq b_1/2$ определяют по (8.254) и при $h_r \geq b_1/2$ — по (8.253), причем

$$b_r = b_1 + \frac{b_2 - b_1}{h_1} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right). \quad (8.255)$$

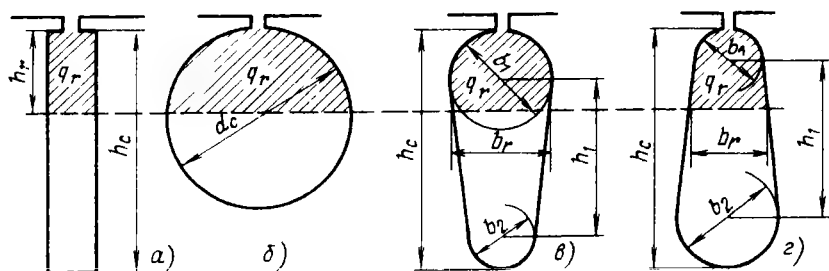


Рис. 8.59. К расчету k_r в стержнях различной конфигурации: h_r – расчетная глубина проникновения тока

Для других конфигураций стержней k_r может быть определен из общего выражения $k_r = q_c/q_r$ с учетом размерных соотношений стержня и глубины проникновения тока в стержень h_r .

Для расчета характеристик необходимо учитывать изменение сопротивления всей обмотки ротора r_2 , поэтому удобно ввести коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$K_R = r_{2\xi}/r_2, \quad (8.256)$$

где $r_{2\xi}$ – сопротивление фазы короткозамкнутого ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока.

Выражение (8.256) легко преобразовать в более удобный для расчета вид:

$$K_R = \frac{r_2 + r'_c(k_r - 1)}{r_2} = 1 + \frac{r'_c}{r_2} (k_r - 1). \quad (8.257)$$

Для прямоугольных стержней это выражение приобретает вид

$$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} \varphi. \quad (8.258)$$

В (8.257) и (8.258) для роторов без радиальных вентиляционных каналов с литой обмоткой (с прилегающими замыкающими кольцами) $r'_c = r_c$.

Для роторов с радиальными вентиляционными каналами и роторов с отставленными замыкающими кольцами

$$r'_c = r_c \frac{l_2 - n_k b_k}{l_r}, \quad (8.259)$$

где l_c — полная длина стержня, равная расстоянию между замыкающими кольцами, м; n_k и b_k — число и ширина, м, радиальных вентиляционных каналов; l_2 — длина сердечника ротора, м.

Активное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом вытеснения тока будет равно:

$$r_{2\xi} = r_2 K_R. \quad (8.260)$$

Обозначив коэффициентом K_x изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока, получим

$$x_{2\xi} = x_2 K_x, \quad (8.261)$$

тогда

$$K_x = \frac{\lambda_{п2\xi} + \lambda_{п2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{п2} + \lambda_{д2}}, \quad (8.262)$$

где $\lambda_{п2\xi}$ — коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом эффекта вытеснения тока:

$$\lambda_{п2\xi} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2\xi},$$

где

$$\Delta\lambda_{п2\xi} = \lambda'_{п2} (1 - k_d);$$

$\lambda'_{п2}$ — коэффициент магнитной проводимости участка паза, занятого проводником с обмоткой (выражение для определения $\lambda'_{п2}$ в формулах табл. 8.25 является множителем перед коэффициентом k_d).

Влияние насыщения на параметры. В предыдущих параграфах рассматривались методы расчета параметров при допущении отсутствия насыщения стали магнитопровода полями рассеяния, магнитная проницаемость которой принималась равной бесконечности. При расчетах параметров холостого хода и рабочих режимов это допущение вполне оправдано, так как токи в этих режимах относительно малы и потоки рассеяния не создают заметного падения магнитного напряжения в стали зубцов. При увеличении скольжения свыше критического и в пусковых режимах токи в обмотках возрастают и потоки рассеяния увеличиваются. Коронки зубцов статора и ротора в машинах средней и большой мощности в большинстве случаев оказываются сильно насыщенными.

Насыщение коронок зубцов (рис. 8.60) приводит к увеличению магнитного сопротивления для части потока рассеяния, магнитные линии которого замыкаются через верхнюю часть паза. Поэтому коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния уменьшается. Несколько

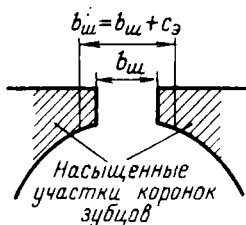


Рис. 8.60. Насыщение участков коронок зубцов потоком рассеяния

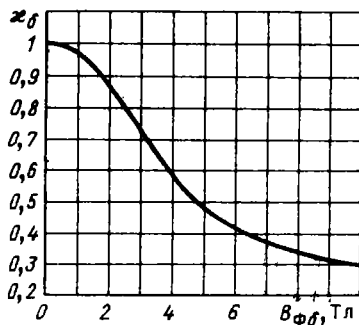


Рис. 8.61. Функция K_δ в зависимости от фиктивной индукции $B_{\delta\phi}$

снижается также магнитная проводимость дифференциального рассеяния. На коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния насыщение стали потоками рассеяния влияния не оказывает.

Уменьшение потока пазового рассеяния из-за насыщения приближенно учитывают введением дополнительного раскрытия паза, равного c_3 . Дополнительное раскрытие c_3 принимается таким, чтобы его магнитное сопротивление потоку рассеяния было равно магнитному сопротивлению насыщенных участков зубцов. При этом условии можно использовать для расчета коэффициент магнитной проводимости паза с учетом насыщения обычные формулы, предполагая, что $\mu_{ст} = \infty$. Уменьшение λ_p из-за насыщения участков зубцов ($\Delta\lambda_{п.нас}$) будет определяться c_3 . Таким образом, c_3 зависит от уровня насыщения верхней части зубцов потоками рассеяния и, следовательно, от МДС паза, т.е. от тока в обмотке. Так как ток обмотки в свою очередь зависит от индуктивного сопротивления, определяемого магнитной проводимостью, то расчет приходится проводить методом последовательных приближений. Первоначально задаются предполагаемой кратностью увеличения тока, обусловленной уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны:

$$k_{нас} = I_{нас} / I,$$

где I — ток, рассчитанный для данного режима без учета насыщения; $I_{нас}$ — ток в этом же режиме работы машины при насыщении участков зубцов полями рассеяния.

Ориентировочно для расчета пусковых режимов принимают $k_{нас} = 1,25 \div 1,4$; для режима максимального момента $k_{нас} = 1,1 \div 1,2$.

Для двигателей с открытыми пазами следует задаваться меньшими значениями $k_{нас}$, при полузакрытых пазах — большими.

Расчет проводят в следующей последовательности. Определяют среднюю МДС обмотки, отнесенную к одному пазу обмотки статора:

$$F_{\text{п.ср}} = 0,7 \frac{k_{\text{нас}} I_1 u_{\text{п1}}}{a} (k'_\beta + k_{y1} k_{\text{об1}} \frac{Z_1}{Z_2}), \quad (8.263)$$

где I_1 — ток статора, соответствующий расчетному режиму, без учета насыщения; a — число параллельных ветвей обмотки статора; $u_{\text{п1}}$ — число эффективных проводников в пазу статора; k'_β — коэффициент, учитывающий уменьшение МДС паза, вызванное укорочением шага обмотки, рассчитывается по (8.156) или по (8.157); k_{y1} — коэффициент укорочения шага обмотки.

По средней МДС $F_{\text{п.ср}}$ рассчитывают фиктивную индукцию потока рассеяния в воздушном зазоре, Тл:

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}}}{1,6\delta C_N} 10^{-6}, \quad (8.264)$$

где коэффициент

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}}, \quad (8.265)$$

(t_{Z1} и t_{Z2} — зубцовые деления статора и ротора).

По полученному значению $B_{\Phi\delta}$ определяют отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины, характеризующее коэффициентом κ_δ , значение которого находят по кривой рис. 8.61.

Далее рассчитывают значения дополнительного эквивалентного раскрытия пазов статора и ротора ($c_{\text{з1}}$ и $c_{\text{з2}}$), магнитные напряжения которых будут эквивалентны МДС насыщенных участков усиков зубцов. Для пазов статора его принимают равным:

$$c_{\text{з1}} = (t_{Z1} - b_{\text{ш1}}) (1 - \kappa_\delta). \quad (8.266)$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния открытого паза (рис. 8.62,а)

$$\Delta\lambda_{\text{п1нас}} = \frac{h_{\text{к}}}{b_{\text{ш}}} \frac{c_{\text{з1}}}{b_{\text{ш}} + c_{\text{з1}}}. \quad (8.267)$$

Для полуоткрытых и полужакрытых пазов расчетная формула несколько усложняется из-за более сложной конфигурации их верхних клиновых частей. Для полуоткрытого паза (рис. 8.62,б)

$$\Delta\lambda_{\text{п1нас}} = \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \frac{c_{\text{з1}}}{b_{\text{ш}} + c_{\text{з1}}} + \frac{h_{\text{к}}}{b_{\text{ш}} + b_{\text{п}}} \frac{c_{\text{з1}}}{b_{\text{ш}} + b_{\text{п}} + c_{\text{з1}}}. \quad (8.268)$$

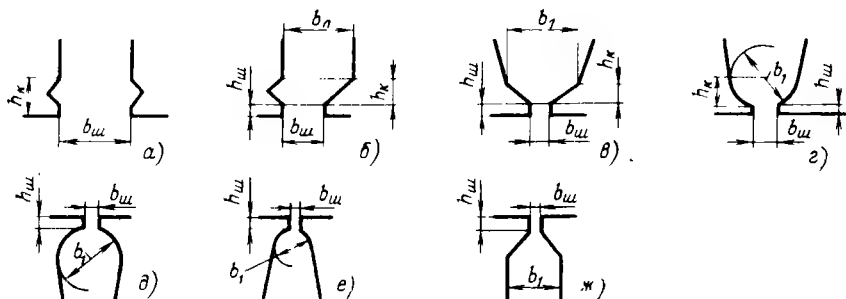


Рис. 8.62. К расчету влияния насыщения потоком рассеяния на коэффициент магнитной проводимости паза:

а-ж – различные конфигурации верхней части пазов

Для полузакрытого паза (рис. 8.62, в, з)

$$\Delta\lambda_{\text{п1нас}} = \frac{h_{\text{ш}} + 0,58h_{\text{к}}}{b_{\text{ш}}} \frac{c_{\text{э1}}}{c_{\text{э1}} + 1,5b_{\text{ш}}} . \quad (8.269)$$

Для фазных и короткозамкнутых роторов дополнительное раскрытие рассчитывают по формуле

$$c_{\text{э2}} = (t_2 - h_{\text{ш}})(1 - \kappa_{\delta}) . \quad (8.270)$$

Уменьшение коэффициента проводимости для открытых и полузакрытых пазов ротора (рис. 8.62, д-ж)

$$\Delta\lambda_{\text{п2нас}} = \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \frac{c_{\text{э2}}}{b_{\text{ш}} + c_{\text{э2}}} . \quad (8.271)$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении $\lambda_{\text{п1нас}}$ определяют для статора из выражения

$$\lambda_{\text{п1нас}} = \lambda_{\text{п1}} - \Delta\lambda_{\text{п1нас}} , \quad (8.272)$$

где $\lambda_{\text{п1}}$ – проводимость, рассчитанная без учета насыщения.

Для ротора

$$\lambda_{\text{п2}\xi\text{нас}} = \lambda_{\text{п2}\xi} - \Delta\lambda_{\text{п2нас}} , \quad (8.273)$$

где $\lambda_{\text{п2}\xi}$ – проводимость пазового рассеяния ротора для ненасыщенной зубцовой зоны с учетом влияния вытеснения тока.

Коэффициенты проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов статора $\lambda_{\text{д1нас}}$ и ротора $\lambda_{\text{д2нас}}$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{д1нас} &= \lambda_{д1} \kappa_{\delta}; \\ \lambda_{д2нас} &= \lambda_{д2} \kappa_{\delta}. \end{aligned} \right\} \quad (8.274)$$

Значения κ_{δ} принимают по кривым рис. 8.61.

Индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом насыщения от полей рассеяния определяют по отношению сумм коэффициентов проводимости, рассчитанных без учета и с учетом насыщения от полей рассеяния:

$$x_{1нас} = x_1 \frac{\Sigma \lambda_{1нас}}{\Sigma \lambda_1} = x_1 \frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}}. \quad (8.275)$$

Для ротора принимают отношения сумм проводимостей, рассчитанных без учета влияния насыщения и действия эффекта вытеснения тока (для номинального режима) и с учетом этих факторов:

$$x'_{2\xiнас} = x'_2 \frac{\Sigma \lambda_{2\xiнас}}{\Sigma \lambda_2} = x'_2 \frac{\lambda_{п2\xiнас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}}. \quad (8.276)$$

Значения параметров $x_{1нас}$ и $x'_{2\xiнас}$ используют при расчете точек характеристик при скольжениях $s \geq s_{кр}$. Полученные для каждой из точек характеристики отношения токов, рассчитанных с учетом и без учета насыщения, сравнивают с принятыми коэффициентами $k_{нас}$. Если расхождение превышает 10–15%, то расчет для этого значения s повторяют, внося соответствующую корректировку в первоначально принимаемый коэффициент $k_{нас}$.

Расчет пусковых характеристик. Пусковые свойства асинхронных двигателей характеризуются начальным пусковым и максимальным моментами и начальным пусковым током. В двигателях с фазными роторами начальный момент и пусковой ток определяются сопротивлением пускового реостата. В двигателях с короткозамкнутыми роторами значения моментов и начального тока зависят от соотношений параметров. Кроме того, важным показателем пусковых свойств короткозамкнутого двигателя является значение минимального момента. Уменьшение момента в процессе разгона двигателя может произойти в связи с изменением соотношения параметров при уменьшении скольжения.

Стандарты на асинхронные двигатели устанавливают наименьшие допустимые относительные значения моментов и наибольшие относительные значения начальных пусковых токов для выпускаемых асинхронных машин в зависимости от их мощности, исполнения и числа пар полюсов. Для короткозамкнутых двигателей регламентируются значения всех перечисленных выше моментов и тока, а для двигателей с фазными ро-

Таблица 8.29. Кратность начальных пусковых моментов $M_{п*}$ и токов $I_{п*}$ асинхронных двигателей

Исполнение	2р	Высота оси вращения, мм					
		≤ 132		160–250		≥ 280	
		$M_{п*}$	$I_{п*}$	$M_{п*}$	$I_{п*}$	$M_{п*}$	$I_{п*}$
IP44	2	1,7–2	6,5–7,5	1,2–1,4	7–7,5	1–1,2	6,5–7
	4	2–2,2	5–7,5	1,2–1,4	6,5–7,5	1,2–1,3	5,5–7
	6	2–2,2	4–6,5	1,2–1,3	5–6,5	1,4	5,5–6,5
	8	1,6–1,9	4–5,5	1,2–1,4	5,5–6	1,2	5,5–6,5
	10	–	–	1,2	6	1	6
	12	–	–	–	–	1	6
IP23	2	–	–	1,2–1,3	7,0	1–1,2	6,5–7
	4	–	–	1,2–1,3	6,5	1–1,2	6,0–7
	6	–	–	1,2	6–7	1,2	6
	8	–	–	1,2–1,3	5,5–6,0	1,2	5,0–5,5
	10	–	–	–	–	1	5,5
	12	–	–	–	–	1	5,5

Примечание. Некоторые двигатели малой мощности с высотой оси вращения $h \leq 80$ мм выполняются с уменьшенной кратностью начального пускового тока.

торами – только значения максимальных моментов, т.е. перегрузочная способность двигателей.

В табл. 8.29 приведены допустимые относительные значения моментов и начального пускового тока двигателей с короткозамкнутыми роторами серии 4А. Спроектированная заново асинхронная машина на базе серии 4А должна иметь пусковые характеристики, удовлетворяющие этим требованиям. В технических условиях или в заданиях на проектирование специальных асинхронных двигателей могут быть поставлены более жесткие требования к этим величинам.

В практике расчетов часто ограничиваются определением только двух точек характеристик: начального пускового и максимального моментов и начального пускового тока. Такой расчет дает лишь приближенные сведения о пусковых свойствах двигателя и может привести к погрешности при определении перегрузочной способности из-за неточности определения критического скольжения. Поэтому при проектировании целесообразно рассчитывать полные пусковые характеристики, т.е. зависимости $M_* = f(s)$ и $I_* = f(s)$ для всего диапазона изменения скольжений от $s = 1$ до значения, соответствующего режиму, близкому к номинальному.

Расчет пусковых характеристик затруднен необходимостью учета изменений параметров, вызванных эффектом вытеснения тока и насыще-

нием от полей рассеяния, так как при больших скольжениях токи в обмотках статора и ротора короткозамкнутых двигателей могут превышать свое минимальное значение в 7–7,5 раза (табл. 8.29).

В то же время при больших токах увеличивается падение напряжения на сопротивлении обмотки статора, что вызывает уменьшение ЭДС и снижение основного потока. Для учета этих факторов необходимо применение ЭВМ [15]. При ручном счете используют следующий упрощенный метод.

Учитывая, что индуктивное сопротивление взаимной индукции x_{12} с уменьшением насыщения магнитопровода увеличивается, в расчете пусковых характеристик для скольжений $s \geq 0,1 \div 0,15$ оно может быть принято равным:

$$x_{12п} \approx x_{12} \frac{F_{п}}{F_{\delta}} = k_{\mu} x_{12}. \quad (8.277)$$

Не внося большой погрешности, в расчетных формулах пусковых режимов пренебрегают сопротивлением r_{12} . Это оправдано при токах, заметно превышающих номинальный, так как электрические потери в обмотках, возрастающие пропорционально квадрату тока, многократно превышают потери в стали, для учета которых в схему замещения введен параметр r_{12} .

При этих допущениях коэффициент

$$c_{1п} = 1 + x_1/x_{12п}. \quad (8.278)$$

и сопротивление правой ветви Г-образной схемы замещения (см. рис. 8.55)

$$Z_{\text{ветви}} = c_{1п} (R_{п} + jX_{п}), \quad (8.279)$$

где для упрощения расчетных формул в отличие от обозначений в расчете рабочих характеристик принято

$$\left. \begin{aligned} R_{п} &= r_1 + c_{1п} r'_{2\xi}/s; \\ X_{п} &= x_1 + c_{1п} x'_{2\xi}. \end{aligned} \right\} \quad (8.280)$$

Ток в обмотке ротора

$$I'_2 = c_{1п} I''_2 = \frac{U_{1ном} c_{1п}}{|Z_{\text{ветви}}|} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}}. \quad (8.281)$$

Сопротивление всей схемы замещения для пусковых режимов

$$Z_{сх} = \frac{c_{1п}(R_{п} + jX_{п})jx_{12п}c_{1п}}{R_{п} + j(X_{п} + x_{12п})} \quad (8.282)$$

Из (8.279) – (8.282)

$$I_1 = \frac{U_{1ном}}{|Z_{сх}|} = I_2' \frac{\sqrt{R_{п}^2 + (X_{п} + x_{12п})^2}}{c_{1п}x_{12п}} \quad (8.283)$$

Характеризующие пусковые данные машины кратность тока и момента при заданном s

$$\left. \begin{aligned} I_{1*} &= I_1 / I_{1ном}; \\ M_* &= \left(\frac{I_2'}{I_{2ном}} \right)^2 K_R \frac{s_{ном}}{s} \end{aligned} \right\} \quad (8.284)$$

Полученные выражения (8.281) – (8.284) дают возможность рассчитать токи и моменты во всем диапазоне изменения скольжения от $s = 1$ до $s = 0,1$.

Расчет рекомендуется проводить в последовательности, определенной в формуляре (табл. 8.30) для пяти-шести точек характеристик в указанном диапазоне изменения скольжения.

Для двигателей, полный ток паза которых $I_{1паза} = I_1 u_{п}/a$ в пусковых режимах превышает 400 А, необходимо учесть влияние насыщения от полей рассеяния на пусковые характеристики. Для этого в расчетах используют уменьшенные в результате насыщения значения сопротивлений обмоток $x_{1нас}$ и $x_{2\xi нас}'$, а также коэффициента

$$c_{1пнас} = 1 + x_{1нас}/x_{12п} \quad (8.285)$$

Степень влияния поля рассеяния на x_1 и $x_{2\xi}'$ зависит от токов в обмотках, но в свою очередь от этих сопротивлений существенно зависят токи статора и ротора. Поэтому прямой расчет $x_{1нас}$ и $x_{2\xi нас}'$ до получения пусковых характеристик невозможен. Значения $x_{1нас}$ и $x_{2\xi нас}'$ находят для каждого из назначенных скольжений методом последовательных приближений. Как известно, объем расчета этим методом зависит от правильного первоначального задания искомой величины. Для данного расчета хорошие результаты дает следующий практический метод задания токов.

Таблица 8.30. Формуляр расчета пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с учетом влияния эффекта вытеснения тока

$$P_{2\text{ном}} = \dots \text{ кВт}; U_{1\text{ном}} = \dots \text{ В}; 2p = \dots; I_{1\text{ном}} = \dots \text{ А};$$

$$I'_{2\text{ном}} = \dots \text{ А}; x_1 = \dots \text{ Ом}; x'_2 = \dots \text{ Ом}; x_{12\text{п}} = \dots \text{ Ом};$$

$$c_{1\text{п}} = \dots; r_1 = \dots \text{ Ом}; r'_2 = \dots \text{ Ом}; s_{\text{ном}} = \dots$$

№ п/п,	Расчетная формула	Едини- ца вели- чины	Скользящие s			
			1	0,8	...	$s = s_{\text{кр}}$
1	$\xi = 2\pi h_c \sqrt{\frac{b_c}{b_{\text{п}}}} \frac{f_2}{\rho_{\text{св}}} 10^{-7}$	—				
2	$\varphi = \varphi(\xi)$	—				
3	$h_r = h_c / (1 + \varphi)$	мм				
4	$k_r = q_c / q_r$	—				
5	$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} (k_r - 1)$	—				
6	$r'_{2\xi} = K_R r'_2$	Ом				
7	$k_{\text{д}} = \varphi'(\xi)$	—				
8	$\lambda_{\text{п}2\xi} = \lambda_{\text{п}2} - \Delta\lambda_{\text{п}2\xi}$	—				
9	$K_x = \Sigma\lambda_{2\xi} / \Sigma\lambda_2$	—				
10	$x'_{2\xi} = K_x x'_2$	Ом				
11	$R_{\text{п}} = r_1 + c_{1\text{п}} \frac{r'_{2\xi}}{\text{I}}$	Ом				
12	$X_{\text{п}} = x_1 + c_{1\text{п}} x'_{2\xi}$	А				
13	$I'_2 = U_{1\text{ном}} / \sqrt{R_{\text{п}}^2 + X_{\text{п}}^2}$	А				
14	$I_1 = I'_2 \sqrt{R_{\text{п}}^2 + (X_{\text{п}} + x_{12\text{п}})^2} / (c_{1\text{п}} x_{12\text{п}})$	А				
15	$I_{1*} = I_1 / I_{1\text{ном}}$	—				
16	$M_* = \left(\frac{I'_2}{I'_{2\text{ном}}} \right)^2 K_R \frac{s_{\text{ном}}}{s}$	—				

отсутствуют страницы

378 – 407

отсутствуют страницы

378 – 407

Выбор главных размеров

1. Высота оси вращения (предварительно) по рис. 8.17, а $h = 0,17$ м. Принимаем ближайшее стандартное значение $h = 160$ мм; $D_a = 0,272$ м (см. табл. 8.6).

2. Внутренний диаметр статора $D = k_D D_a = 0,68 \cdot 0,272 = 0,185$ м, k_D — по табл. 8.7.

3. Полусное деление $\tau = \pi D / (2p) = \pi 0,185 / 4 = 0,145$ м.

4. Расчетная мощность по (8.4)

$$P' = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos \varphi} = \frac{15 \cdot 10^3 \cdot 0,975}{0,88 \cdot 0,88} = 18\,885 \text{ В} \cdot \text{А} \approx 18\,900 \text{ В} \cdot \text{А}$$

(k_E — по рис. 8.20; η и $\cos \varphi$ — по рис. 8.21, а).

5. Электромагнитные нагрузки (предварительно по рис. 8.22, б)

$$A = 32 \cdot 10^3 \text{ А/м}; B_\delta = 0,75 \text{ Тл}.$$

6. Обмоточный коэффициент (предварительно для однослойной обмотки) $k_{об1} = 0,95$.

7. Расчетная длина магнитопровода по (8.6)

$$l_\delta = \frac{P'}{k_B D^2 \Omega k_{об1} A B_\delta} =$$

$$= \frac{18\,900}{1,11 \cdot 0,185^2 \cdot 157 \cdot 0,95 \cdot 32 \cdot 10^3 \cdot 0,75} = 0,139 \approx 0,14 \text{ м}$$

[по (8.5) $\Omega = 2\pi f/p = 2\pi \cdot 50/2 = 157$ рад/с].

8. Отношение $\lambda = l_\delta / \tau = 0,14 / 0,145 = 0,97$. Значение $\lambda = 0,97$ находится в допустимых пределах (см. рис. 8.25).

Определение Z_1 , w_1 и площади поперечного сечения провода обмотки статора

9. Предельные значения t_{Z1} (по рис. 8.26): $t_{Z1\max} = 15$ мм; $t_{Z1\min} = 12$ мм.

10. Число пазов статора по (8.16)

$$Z_{1\min} = \frac{\pi D}{t_{Z1\max}} = \frac{\pi \cdot 0,185}{0,015} = 39;$$

$$Z_{1\max} = \frac{\pi D}{t_{Z1\min}} = \frac{\pi \cdot 0,185}{0,012} = 48.$$

Принимаем $Z_1 = 48$, тогда $q_1 = Z_1 / (2pt)$; $48 / (4 \cdot 3) = 4$. Обмотка однослойная.

11. Зубцовое деление статора (окончательно)

$$t_{Z1} = \frac{\pi D}{2ptq} = \frac{\pi \cdot 0,185}{4 \cdot 3 \cdot 4} = 12,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

12. Число эффективных проводников в пазу [предварительно, при условии $a = 1$ по (8.17)]

$$u_{\Pi}' = \frac{\pi D A}{I_{\text{ном}} Z_1} = \frac{\pi \cdot 0,185 \cdot 32 \cdot 10^3}{29,3 \cdot 48} = 13,2;$$

[по (8.18)]

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_2}{m U_{\text{ном}} \cos \varphi \eta} = \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,88} = 29,3 \text{ A}]$$

13. Принимаем $a = 1$, тогда по (8.19) $u_{\Pi} = a u_{\Pi}' = 13$ проводников.

14. Окончательные значения:

число витков в фазе по (8.20)

$$w_1 = \frac{u_{\Pi} Z_1}{2 a m} = \frac{13 \cdot 48}{2 \cdot 3} = 104;$$

линейная нагрузка по (8.21)

$$A = \frac{2 I_{\text{ном}} w_1 m}{\pi D} = \frac{2 \cdot 29,3 \cdot 104 \cdot 3}{\pi 0,185} = 31,5 \cdot 10^3 \text{ A/м};$$

магнитный поток по (8.22)

$$\Phi = \frac{k_E U_{\text{ном}}}{4 k_B w_1 k_{\text{об1}} f_1} = \frac{0,975 \cdot 220}{4,44 \cdot 104 \cdot 0,958 \cdot 50} = 9,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

(для однослойной обмотки с $q = 4$ по табл. 3.15 $k_{\text{об1}} = k_{p1} = 0,958$; для $D_a = 0,272 \text{ м}$ по рис. 8.20 $k_E = 0,975$);

индукция в воздушном зазоре по (8.23)

$$B_{\delta} = \frac{\mu \Phi}{D l_{\delta}} = \frac{2 \cdot 9,7 \cdot 10^{-3}}{0,185 \cdot 0,14} = 0,749 \text{ Тл}.$$

Значения A и B_{δ} находятся в допустимых пределах (см. рис. 8.22, б).

15. Плотность тока в обмотке статора (предварительно) по (8.25)

$$J_1 = \frac{(A y_1)}{A} = \frac{180 \cdot 10^9}{31,5 \cdot 10^3} = 5,71 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2$$

($A J_1 = 1,80 \cdot 10^9$ по рис. 8.27, б).

16. Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно) по (8.24)

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{\text{ном}}}{a J_1} = \frac{29,3}{5,71 \cdot 10^6} = 5,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 5,13 \text{ мм}^2.$$

17. Сечение эффективного проводника (окончательно): принимаем $n_{\text{эл}} = 3$, тогда $q_{\text{эл}} = q_{\text{эф}} / n_{\text{эл}} = 5,13 / 3 = 1,71 \text{ мм}^2$. Принимаем обмоточный провод марки ПЭТГ 1 (см. приложение 3), $d_{\text{эл}} = 1,5 \text{ мм}$, $q_{\text{эл}} = 1,767 \text{ мм}^2$, $q_{\text{эл.ср}} = n_{\text{эл}} q_{\text{эл}} = 3 \cdot 1,767 = 5,3 \text{ мм}^2$.

18. Плотность тока в обмотке статора (окончательно) по (8.27)

$$J_1 = \frac{I_{\text{ном}}}{a q_{\text{эл}} n_{\text{эл}}} = \frac{29,3}{1,767 \cdot 3} = 5,53 \text{ А/мм}^2.$$

Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Паз статора определяем по рис. 8.29, а с соотношением размеров, обеспечивающих параллельность боковых граней зубцов.

19. Принимаем предварительно по табл. 8.10 $B_{Z1} = 1,9 \text{ Тл}$; $B_a = 1,6 \text{ Тл}$, тогда по (8.37)

$$b_{Z1} = \frac{B_{\delta}^t Z_1 l_{\delta}}{B_{Z1} l_{\text{ст1}} k_c} = \frac{0,749 \cdot 12,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14}{1,9 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4,9 \text{ мм}$$

(по табл. 8.11 для оксидированной стали марки 2013 $k_c = 0,97$);
по (8.28)

$$h_a = \frac{\Phi}{2 B_a l_{\text{ст}} k_c} = \frac{9,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,6 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 22,3 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 22,3 \text{ мм}.$$

20. Размеры паза в штампе: $b_{\text{ш}} = 3,7 \text{ мм}$; $h_{\text{ш}} = 1 \text{ мм}$; $\beta = 45^\circ$ (см. рис. 8.29, а);
по (8.38)

$$h_{\text{п}} = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0,272 - 0,185}{2} - 0,0223 = 0,0212 \text{ м} = 21,2 \text{ мм};$$

по (8.40)

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{\text{ш}} - b_{\text{ш}}) - Z_1 b_{Z1}}{Z_1 - \pi} =$$

$$= \frac{\pi(185 + 2 - 3,7) - 48 \cdot 4,9}{48 - \pi} = 7,59 \approx 7,6 \text{ мм};$$

по (8.39)

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_{\text{п}})}{Z_1} - b_{Z1} = \frac{\pi(185 + 2 \cdot 21,2)}{48} - 4,9 = 9,98 \approx 10 \text{ мм};$$

по (8.42) - (8.45)

$$h_{\text{п.к}} = h_{\text{п}} - \left(h_{\text{ш}} + \frac{b_1 - b_{\text{ш}}}{2} \right) = 21,2 - \left(1 + \frac{7,6 - 3,7}{2} \right) = 18,25 \approx 18,3 \text{ мм}.$$

Паз статора показан на рис. 8.76, а.

21. Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку:

$$b_1' = b_1 - \Delta b_{\text{п}} = 7,6 - 0,2 = 7,4 \text{ мм};$$

Рис. 8.76. Пазы спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором ($P_2 = 15$ кВт, $2p = 4$, $U_{ном} = 220/380$ В)

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_{\pi} = 10 - 0,2 = 9,8 \text{ мм};$$

$$h'_{п.к} = h_{п.к} - \Delta h = 18,3 - 0,2 = 18,1 \text{ мм}.$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки по (8.48)

$$S'_{\pi} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_{п.к} - (S_{из} + S_{пр}) = \frac{7,4 + 9,8}{2} 18,1 - 24 = 131,7 \text{ мм}^2$$

[площадь поперечного сечения прокладок $S_{пр} = 0$; площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу

$$S_{из} = b_{из} (2h_{\pi} + b_1 + b_2) = 0,4 (2 \cdot 21,2 + 7,6 + 10) = 24 \text{ мм}^2,$$

где односторонняя толщина изоляции в пазу $b_{из} = 0,4$ мм — по табл. 3.1].

22. Коэффициент заполнения паза

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 u_{\pi} n_{эл}}{S'_{\pi}} = \frac{1,585^2 \cdot 13 \cdot 3}{131,7} = 0,74.$$

Полученное значение k_3 допустимо для механизированной укладки обмотки.

Расчет ротора

23. Воздушный зазор (по рис. 8.31) $\delta = 0,5$ мм.

24. Число пазов ротора (по табл. 8.16) $Z_{Z_2} = 38$.

25. Внешний диаметр ротора $D_2 = D - 2\delta = 0,185 - 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,184$ м.

26. Длина магнитопровода ротора $l_2 = l_1 = 0,14$ м.

27. Зубцовое деление ротора

$$\tau_{Z_2} = \pi D_2 / Z_2 = \pi 0,184 / 38 = 0,0152 \text{ м} = 15,2 \text{ мм}.$$

28. Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник ротора непосредственно насаживается на вал; по (8.102)

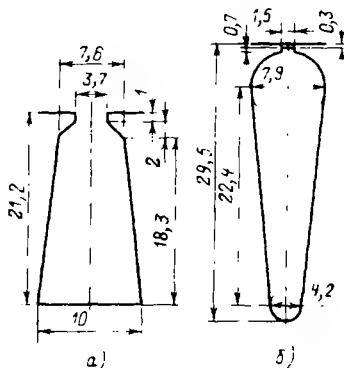
$$D_i = D_{\text{в}} = k_{\text{в}} D_{\text{д}} = 0,23 \cdot 0,272 = 0,0626 \text{ м} \approx 60 \text{ мм}$$

($k_{\text{в}}$ — по табл. 8.17).

29. Ток в обмотке ротора по (8.57)

$$I_2 = k_i I_1 \nu_i = 0,904 \cdot 29,3 \cdot 15,73 = 417 \text{ А},$$

где по (8.58) $k_i = 0,2 + 0,8 \cos \varphi = 0,2 + 0,8 \cdot 0,88 = 0,904$



[по (8.66)]

$$\nu_i = \frac{2m_1 w_1 k_{об1}}{Z_2 k_{ск}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 104 \cdot 0,958}{38} = 15,73$$

(пазы ротора выполняем без скоса — $k_{ск} = 1$)]

30. Площадь поперечного сечения стержня (предварительно) по (8.68)

$$q_c = I_2 / J_2 = 417 / (2,5 \cdot 10^6) = 166,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 166,8 \text{ мм}^2$$

(плотность тока в стержне литой клетки принимаем $J_2 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$).

31. Паз ротора определяем по рис. 8.40, б. Принимаем $b_{ш} = 1,5 \text{ мм}$; $h_{ш} = 0,7 \text{ мм}$; $h'_{ш} = 0,3 \text{ мм}$.

Допустимая ширина зубца по (8.75)

$$b_{Z2\text{доп}} = \frac{B_{\delta}^r Z_2 l_{\delta}}{B_{Z2} l_{ст2} k_c} =$$

$$= \frac{0,749 \cdot 15,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14}{1,8 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 6,52 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 6,5 \text{ мм}$$

(принимаем $B_{Z2} = 1,8 \text{ Тл}$ по табл. 8.10).

Размеры паза (см. рис. 8.40):
по (8.76)

$$b_1 = \frac{\pi (D_2 - 2h_{ш} - 2h'_{ш}) - Z_2 b_{Z2}}{\pi + Z_2} =$$

$$= \frac{\pi (184 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 38 \cdot 6,5}{\pi + 38} = 7,9 \text{ мм};$$

по (8.77)

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4q_c}{\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{7,9^2 \left(\frac{38}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot 166,8}{\frac{38}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = 4,2 \text{ мм};$$

по (8.78)

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Z_2}{2\pi} = (7,9 - 4,2) \frac{38}{2 \cdot \pi} = 22,38 \approx 22,4 \text{ мм}.$$

32. Уточняем ширину зубцов ротора по формулам табл. 8.18:

$$b'_{Z2} = \pi \frac{D_2 - 2(h_{\text{ш}} + h'_{\text{ш}})b_1}{Z_2} - b_1 =$$

$$= \pi \frac{184 - 2(0,7 + 0,3) \cdot 7,9}{38} - 7,9 = 6,49 \text{ мм} \approx 6,5 \text{ мм};$$

$$b''_{Z2} = \pi \frac{D_2 - 2h_{\text{п}} \cdot b_2}{Z_2} - b_2 = \pi \frac{184 - 2 \cdot 29,4 + 4,2}{38} - 4,2 = 6,5 \text{ мм};$$

$$b'_{Z2} = b''_{Z2} \approx 6,5 \text{ мм}.$$

Принимаем (см. рис. 8.76, б) $b_1 = 7,9$; $b_2 = 4,2$ мм; $h_1 = 22,4$ мм.
Полная высота паза

$$h_{\text{п2}} = h'_{\text{ш}} + h_{\text{ш}} + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} =$$

$$= 0,3 + 0,7 + \frac{7,9}{2} + 22,4 + \frac{4,2}{2} = 29,5 \text{ мм}.$$

33. Площадь поперечного сечения стержня по (8.79)

$$q_c = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) h_1 =$$

$$= \frac{\pi}{8} (7,9^2 + 4,2^2) + 0,5 (7,9 + 4,2) 22,4 = 166,96 \approx 167 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в стержне

$$J_2 = I_2 / q_c = 417 / 167 \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}.$$

34. Короткозамыкающие кольца (см. рис. 8.37, б). Площадь поперечного сечения кольца по (8.72)

$$q_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{кл}}}{J_{\text{кл}}} = \frac{1267}{2,13 \cdot 10^6} = 595 \text{ мм}^2$$

[по (8.70) и (8.71)]

$$I_{\text{кп}} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{417}{0,329} = 1267 \text{ А},$$

где

$$\Delta = 2 \sin \frac{\alpha_Z}{2} = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 2}{38} = 0,329;$$

$$J_{\text{кл}} = 0,85 J_2 = 0,85 \cdot 2,5 \cdot 10^6 = 2,13 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2].$$

Размеры размыкающих колец:

$$h_{\text{кл}} = 1,25 h_{\text{п2}} = 1,25 \cdot 29,5 = 37 \text{ мм};$$

$$b_{\text{кл}} = q_{\text{кл}} / h_{\text{кл}} = 595 / 37 = 16 \text{ мм};$$

$$q_{\text{кл}} = h_{\text{кл}} b_{\text{кл}} = 37 \cdot 16 = 592 \text{ мм}^2;$$

$$D_{\text{к.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}} = 184 - 37 = 147 \text{ мм}.$$

Расчет магнитной цепи

Магнитопровод из стали 2013; толщина листов 0,5 мм.

35. Магнитное напряжение воздушного зазора по (8.103)

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_{\delta} \delta k_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,749 \cdot 1,22 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 726,5 \text{ А}$$

[по (4.15)]

$$k_{\delta} = \frac{r_{Z1}}{r_{Z1} - \gamma_1 \delta} = \frac{12,1}{12,1 - 4,42 \cdot 0,5} = 1,22, \text{ где}$$

$$\gamma_1 = \frac{(b_{\text{ш1}}/\delta)^2}{5 + b_{\text{ш1}}/\delta} = \frac{(3,7/0,5)^2}{5 + 3,7/0,5} = 4,42.$$

36. Магнитное напряжение зубцовой зоны статора по (8.104)

$$F_{Z1} = 2h_{Z1} H_{Z1} = 2 \cdot 21,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2070 = 87,8 \text{ А},$$

где $h_{Z1} = h_{\text{п1}} = 21,2 \text{ мм}$ (см п. 20 расчета);
расчетная индукция в зубцах по (8.105)

$$B'_{Z1} = \frac{B_{\delta} r_{Z1} l_{\delta}}{b_{Z1} l_{\text{ст1}} k_{\text{с1}}} = \frac{0,749 \cdot 12,1 \cdot 0,14}{4,9 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 1,91 \text{ Тл}$$

($b_{Z1} = 4,9 \text{ мм}$ по п. 19 расчета; $k_{\text{с1}} = 0,97$ по табл. 8.11). Так как $B'_{Z1} > 1,8 \text{ Тл}$, необходимо учесть отклонение потока в паз и найти действительную индукцию в зубце B_{Z1} . Коэффициент $k_{\text{пх}}$ по высоте $h_{Zx} = 0,5 h_Z$ по (4.33)

$$k_{\text{пх}} = \frac{b_{\text{пх}} l_{\delta}}{b_{Zx} l_{\text{ст1}} k_{\text{с1}}} = \frac{8,8 \cdot 0,14}{4,9 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 1,85,$$

где

$$b_{\text{пх}} = \frac{b_1 + b_2}{2} = \frac{7,6 + 10}{2} = 8,8;$$

по (4.32)

$$B_{Z1} = B'_{Z1} - \mu_0 H_{Z1} k_{пх}.$$

Принимаем $B_{Z1} = 1,9$ Тл, проверяем соотношение B_{Z1} и B'_{Z1} :

$$1,9 = 1,91 - 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 2070 \cdot 1,85 = 1,9,$$

где для $B_{Z1} = 1,9$ Тл по табл. П1.7 $H_{Z1} = 2070$ А/м.

37. Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора по (8.108)

$$F_{Z2} = 2h_{Z2}H_{Z2} = 2 \cdot 0,029 \cdot 1570 = 91,1 \text{ А}$$

[при зубцах по рис. 8.40, б из табл. 8.18 $h_{Z2} = h_{п2} - 0,1b_2 = 29,4 - 0,1 \cdot 4,2 = 29$ мм;

индукция в зубце по (8.109)

$$B_{Z2} = \frac{B_{\delta} l_{Z2} l_{\delta}}{b_{Z2} l_{ст2} k_{с2}} = \frac{0,749 \cdot 15,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14}{6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 1,81 \text{ Тл};$$

по табл. П1.7 для $B_{Z2} = 1,81$ Тл находим $H_{Z2} = 1570$ А/м].

38. Коэффициент насыщения зубцовой зоны по (8.115)

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{87,8 + 91,1}{726,5} = 1,25.$$

39. Магнитное напряжение ярма статора по (8.116)

$$F_a = L_a H_a = 0,196 \cdot 750 = 147 \text{ А}$$

[по (8.119)

$$L_a = \pi \frac{D_a - h_a}{2p} = \pi \frac{0,272 - 0,0223}{4} = 0,196 \text{ м},$$

где

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{п1} = \frac{0,272 - 0,185}{2} - 21,2 \cdot 10^{-3} = 22,3 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

по (8.117)

$$B_a = \frac{\Phi}{2h'_a l_{ст1} k_{с1}} = \frac{9,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 22,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 1,6 \text{ Тл}$$

(при отсутствии радиальных вентиляционных каналов в статоре $h'_a = h_a = 22,3 \cdot 10^{-3}$ м) для $B_a = 1,6$ Тл по табл. П1.6 находим $H_a = 750$ А/м].

40. Магнитное напряжение ярма ротора по (8.121)

$$F_y = L_y H_y = 72,7 \cdot 10^{-3} \cdot 155 = 11,3 \text{ А}$$

[по (8.127)]

$$l_j = \frac{\pi(D_j + h_j)}{2p} = \frac{\pi(60 + 32,6) \cdot 10^{-3}}{4} = 72,7 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

где

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} = \frac{0,184 - 0,06}{2} - 29,4 \cdot 10^{-3} = 32,6 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

по (8.122)

$$B_j = \frac{\Phi}{2h_j^1 l_{ст2} k_{с2}} = \frac{9,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 39,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 0,91 \text{ Тл,}$$

где по (8.124) для четырехполюсных машин при $0,75 (0,5 D_2 - h_{п2}) < D_j$

$$h_j^1 = \frac{2+p}{3,2p} \left(\frac{D_2}{2} - h_{п2} \right) - \frac{2}{3} d_{к2} m_{к2} =$$

$$= \frac{2+2}{3,2 \cdot 2} (0,5 \cdot 0,184 - 29,4 \cdot 10^{-3}) = 39,1 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

для $B_j = 0,91 \text{ Тл}$ по табл. П1.6 находим $H_j = 155 \text{ А/м}$.

41. Магнитное напряжения на пару полюсов (по 8.128)

$$F_{ц} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j =$$

$$= 726,5 + 87,8 + 91,1 + 147 + 11,3 = 1063,7 \text{ А.}$$

42. Коэффициент насыщения магнитной цепи по (8.129)

$$k_{\mu} = F_{ц} / F_{\delta} = 1063,7 / 726,5 = 1,46.$$

43. Намагничивающий ток по (8.130)

$$I_{\mu} = \frac{p F_{ц}}{0,9 m \omega_1 k_{об1}} = \frac{2 \cdot 1063,7}{0,9 \cdot 3 \cdot 104 \cdot 0,958} = 7,91 \text{ А.}$$

Относительное значение по (8.131)

$$I_{\mu*} = I_{\mu} / I_{ном} = 7,91 / 29,3 = 0,27.$$

Параметры рабочего режима

44. Активное сопротивление обмотки статора по (8.132)

$$r_1 = k_R \rho_{115} \frac{L_1}{q_{эф} a} = \frac{10^{-6} \cdot 77,17}{41 \cdot 5,3 \cdot 10^{-6}} = 0,355 \text{ Ом}$$

(для класса нагревостойкости изоляции I расчетная температура $\nu_{расч} = 115^{\circ} \text{C}$;

для медных проводников $\rho_{115} = 10^{-6}/41 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Длина проводников фазы обмотки по (8.134)

$$L_1 = l_{\text{ср1}} w_1 = 0,742 \cdot 104 = 77,17 \text{ м};$$

по (8.135) $l_{\text{ср1}} = 2(l_{\text{п1}} + l_{\text{п1}}) = 2(0,14 + 0,231) = 0,742 \text{ м}$; $l_{\text{п1}} = l_1 = 0,14 \text{ м}$;

по (8.136) $l_{\text{л1}} = K_{\text{л}} b_{\text{кт}} + 2B = 1,3 \cdot 0,162 + 2 \cdot 0,01 = 0,231 \text{ м}$, где $B = 0,01 \text{ м}$;

по табл. 8.21 $K_{\text{л}} = 1,3$;

по (8.138)

$$b_{\text{кт}} = \frac{\pi(D + h_{\text{п1}})}{2\rho} \beta = \frac{\pi(0,185 + 0,0212)}{4} = 0,162 \text{ м}.$$

Длина выплета лобовой части катушки по (8.140)

$$l_{\text{выл}} = k_{\text{выл}} b_{\text{кт}} + B = 0,4 \cdot 0,162 + 0,01 = 0,0748 \text{ м} = 74,8 \text{ мм},$$

где по табл. 8.21 $K_{\text{выл}} = 0,4$.

Относительное значение

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = 0,355 \frac{29,3}{220} = 0,047$$

45. Активное сопротивление фазы обмотки ротора по (8.168)

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{\text{кл}}}{\Delta^2} = 40,89 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0,329^2} = 59,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

по (8.169)

$$r_c = \rho_{115} \frac{l_2}{q_c} = \frac{10^{-6}}{20,5} \frac{0,14}{167 \cdot 10^{-6}} = 40,89 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

по (8.170)

$$r_{\text{кл}} = \rho_{115} \frac{\pi D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 q_{\text{кл}}} = \frac{10^{-6} \cdot \pi \cdot 0,147}{20,5 \cdot 38 \cdot 595 \cdot 10^{-6}} = 10^{-6} \text{ Ом},$$

где для литой алюминиевой обмотки ротора $\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20,5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Приводим r_2 к числу витков обмотки статора по (8.172), (8.173):

$$r_2' = r_2 \frac{4m(w_1 k_{\text{об1}})^2}{Z_2 k_{\text{ск}}} = 59,37 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3 (104 \cdot 0,958)^2}{38} = 0,186 \text{ Ом}.$$

Относительное значение

$$r_2' = r_2 \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = 0,186 \frac{29,3}{220} = 0,0248.$$

46. Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по (8.152)

$$X_1 = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} (\lambda_{п1} + \lambda_{п1} + \lambda_{д1}) =$$

$$= 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{104}{100} \right)^2 \frac{0,14}{2 \cdot 4} (1,42 + 1,34 + 1,74) = 0,673 \text{ Ом},$$

где по табл. 8.24 (см. рис. 8.50, е) и по рис. 8.76

$$\lambda_{п} = \frac{h_2}{3b_1} k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_{\kappa}}{b_1 + 2b_{ш}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \right) k'_\beta =$$

$$= \frac{17,3}{3 \cdot 7,6} + \frac{3 \cdot 1,95}{7,6 + 2 \cdot 3,7} + \frac{1}{3,7} = 1,42,$$

где (см. рис. 8.50, е и 8.76)

$$h_2 = h_{п.к} - 2b_{мз} = 18,1 - 2 \cdot 0,4 = 17,3 \text{ мм}; \quad b_1 = 7,6 \text{ мм}; \quad h_{\kappa} = 0,5(b_1 - b_{ш}) =$$

$$= 0,5(7,6 - 3,7) = 1,95 \text{ мм}; \quad h_1 = 0 \text{ (проводники закреплены пазовой крышкой)};$$

$$k_\beta = 1; \quad k'_\beta = 1; \quad l'_\delta = l_\delta = 0,14 \text{ м по (8.154)};$$

по (8.159)

$$\lambda_{п1} = 0,34 \frac{q}{l'_\delta} (l_{п} - 0,64\beta\tau) = 0,34 \frac{4}{0,14} (0,231 - 0,64 \cdot 0,145) = 1,34;$$

по (8.174)

$$\lambda_{д1} = \frac{r_{Z1}}{12\delta k_\delta} \xi = \frac{12,1}{12 \cdot 0,5 \cdot 1,22} 1,05 = 1,74$$

[по (8.176)]

$$\xi = 2k'_{ск} k_\beta - k_{об1}^2 \left(\frac{r_{Z2}}{r_{Z1}} \right)^2 (1 + \beta_{ск}^2) =$$

$$= 2 \cdot 1,25 - 0,958^2 \left(\frac{15,2}{12,1} \right)^2 = 1,05;$$

для $\beta_{ск} = 0$ и $r_{Z2}/r_{Z1} = 15,2/12,1 = 1,26$ по рис. 8.51, д $k'_{ск} = 1,25$.

Относительное значение

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0,673 \frac{29,3}{220} = 0,09.$$

47. Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора по (8.177)

$$x_2 = 7,9 f_1 l'_\delta (\lambda_{п2} + \lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{ск}) \cdot 10^{-6} =$$

$$= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,14 (2,58 + 0,59 + 2,09) = 291 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

где по табл. 8.25 (см. рис. 8.52, а, ж)

$$\begin{aligned} \lambda_{п2} &= \left[\frac{h_0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b_1} \right] k_{п} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} + \\ &+ 1,12 \frac{h_{ш}^i \cdot 10^6}{l_2} = \frac{24,08}{3 \cdot 7,9} \left(1 - \frac{\pi \cdot 7,9^2}{8 \cdot 167} \right)^2 + \\ &+ 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 7,9} + \frac{0,7}{1,5} + 1,12 \frac{0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{417} = 2,58, \end{aligned}$$

где (см. рис. 8.52, а, ж и рис. 8.76)

$$\begin{aligned} h_0 &= h_1 + 0,4b_2 = 22,4 + 0,4 \cdot 4,2 = 24,08 \text{ мм}; \quad b_1^i = 7,9 \text{ мм}; \quad b_{ш} = 1,5 \text{ мм}; \\ h_{ш} &= 0,7 \text{ мм}; \quad h_{ш}^i = 0,3 \text{ мм}; \quad q_c = 167 \text{ мм}^2; \end{aligned}$$

по (8.178)

$$\begin{aligned} \lambda_{п2} &= \frac{2,3D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 l_{\delta}^2 \Delta^2} \lg \frac{4,7D_{\text{кл.ср}}}{h_{\text{кл}} + 2b_{\text{кл}}} = \\ &= \frac{2,3 \cdot 0,147}{38 \cdot 0,14 \cdot 0,329^2} \lg \frac{4,7 \cdot 0,147}{0,037 + 2 \cdot 0,016} = 0,587; \end{aligned}$$

по (8.180)

$$\lambda_{п2} = \frac{l_{Z2}}{12\delta k_{\delta}} \xi = \frac{15,2 \cdot 1,005}{12 \cdot 0,5 \cdot 1,22} = 2,09$$

[по (8.181)]

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_Z}{1 - \left(\frac{p}{Z} \right)^2} = 1,005,$$

так как при закрытых пазах $\Delta_Z \approx 0$.

Приводим x_2 к числу витков статора по (8.172) и (8.183):

$$x_2^i = x_2 \frac{4m(w_1 k_{\text{обл}})^2}{Z_2 k_{\text{ск}}^2} = 291 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3 (104 \cdot 0,958)^2}{38} = 0,912 \text{ Ом}.$$

Относительное значение

$$x_{2*}^i = x_2^i \frac{I_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = 0,912 \frac{29,3}{220} = 0,121.$$

Расчет потерь

48. Потери в стали основные по (8.187)

$$P_{\text{ст.осн}} = p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^{\beta} (k_{\text{да}} B_a^2 m_a + k_{\text{дз}} B_{Z1}^2 m_{Z1}) =$$

$$= 2,5 (1,6 \cdot 1,6^2 \cdot 18,53 + 1,8 \cdot 1,92^2 \cdot 5,28) = 276,4 \text{ Вт}$$

$p_{1,0/50} = 2,5 \text{ Вт/кг}$ для стали 2013 по табл. 8.26;
по (8.188)

$$m_a = \pi (D_a - h_a) h_a l_{\text{ст1}} k_{\text{с1}} \nu_{\text{с}} =$$

$$= \pi (0,272 - 0,0223) \cdot 0,0223 \cdot 0,14 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 18,53 \text{ кг};$$

по (8.189)

$$m_{Z1} = h_{Z1} b_{Z1\text{ср}} Z_1 l_{\text{ст1}} k_{\text{с1}} \nu_{\text{с}} =$$

$$= 21,2 \cdot 10^{-3} \cdot 4,9 \cdot 10^{-3} \cdot 48 \cdot 0,14 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 5,28 \text{ кг};$$

$$k_{\text{да}} = 1,6; k_{\text{дз}} = 1,8 \text{ (см. § 8.10) }.$$

49. Поверхностные потери в роторе по (8.194)

$$P_{\text{пов2}} = p_{\text{пов2}} (t_{Z2} - b_{\text{ш2}}) Z_2 l_{\text{ст2}} =$$

$$= 242,4 (15,2 - 1,5) 38 \cdot 0,14 = 17,7 \text{ Вт};$$

по (8.192)

$$P_{\text{пов2}} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n_1}{10\,000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{Z1} \cdot 10^3)^2 =$$

$$= 0,5 \cdot 1,5 \left(\frac{48 \cdot 1500}{10\,000} \right)^{1,5} (0,338 \cdot 12,1)^2 = 242,4 \text{ Вт/м}^2,$$

где $k_{02} = 1,5$;
по (8.190)

$$B_{02} = \beta_{02} k_{\delta} B_{\delta} = 0,37 \cdot 1,22 \cdot 0,749 = 0,338 \text{ Тл};$$

для $b_{\text{ш}}/\delta = 3,7/0,5 = 7,4$ по рис. 8.53 $\beta_{02} = 0,37$.

50. Пульсационные потери в зубцах ротора по (8.200)

$$P_{\text{пул2}} = 0,11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{\text{пул2}} \right)^2 m_{Z2} =$$

$$= 0,11 \left(\frac{45 \cdot 1500}{1000} 0,132 \right)^2 7,59 = 75,4 \text{ Вт};$$

по (8.196)

$$B_{\text{пул2}} = \frac{\gamma_1 \delta}{2l_{Z2}} B_{Z2\text{ср}} = \frac{4,42 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 15,2 \cdot 10^{-3}} 1,81 = 0,132 \text{ Тл};$$

$B_{Z2\text{ср}} = 1,81 \text{ Тл}$ из п. 37 расчета; $\gamma_1 = 4,42$ из п. 35 расчета;
по (8.201)

$$m_{Z2} = Z_2 h_{Z2} b_{Z2\text{ср}} l_{\text{ст2}} k_{\text{с2}} \gamma_{\text{с}} =$$

$$= 38 \cdot 29 \cdot 10^{-3} \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 7,59 \text{ кг};$$

$h_{Z2} = 29 \text{ мм}$ из п. 37 расчета; $b_{Z2} = 6,5 \text{ мм}$ из п. 32 расчета.

51. Сумма добавочных потерь в стали по (8.202)

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов1}} + P_{\text{пул1}} + P_{\text{пов2}} + P_{\text{пул2}} =$$

$$= 17,7 + 75,4 = 93,1 \text{ Вт.}$$

52. Полные потери в стали по (8.203)

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}} = 276,4 + 93,1 = 369,5 \text{ Вт.}$$

53. Механические потери по (8.210)

$$P_{\text{мех}} = K_T \left(\frac{\pi}{10} \right)^2 D_a^4 = 0,95 \left(\frac{1500}{10} \right)^2 0,272^4 = 117 \text{ Вт}$$

[для двигателей с $2p=4$ коэффициент $K_T = 1,3(1 - D_a) = 1,3(1 - 0,272) = 0,95]$.

54. Холостой ход двигателя:

по (8.217)

$$I_{\text{х.х}} \approx \sqrt{I_{\text{х.х.а}}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,84^2 + 7,91^2} = 7,95 \text{ А}$$

[по (8.218)]

$$I_{\text{х.х.а}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{эл х.х}}}{mU_{\text{ном}}} = \frac{369,5 + 117 + 66,6}{3 \cdot 220} = 0,84 \text{ А,}$$

где по (8.219)

$$P_{\text{эл х.х}} \approx 3 I_{\mu}^2 r_1 = 3 \cdot 7,91^2 \cdot 0,355 = 66,6 \text{ Вт};$$

по (8.221)

$$\cos \varphi_{\text{х.х}} = I_{\text{х.х.а}} / I_{\text{х.х}} = 0,84 / 7,95 = 0,11.$$

Расчет рабочих характеристик

55. Параметры:

по (8.184)

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m I_{\mu}^2} = \frac{276,4}{3 \cdot 7,91^2} = 1,47 \text{ Ом};$$

по (8.185)

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_{\mu}} \quad \dots \quad x_1 = \frac{220}{7,91} - 0,673 = 27,14 \text{ Ом};$$

по (8.223)

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0,673}{27,14} = 1,025$$

[используем приближенную формулу, так как $|\gamma| < 1^\circ$:

$$\begin{aligned} \gamma &= \arctg \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})} = \\ &= \frac{0,355 \cdot 27,14 - 1,47 \cdot 0,673}{1,47 \cdot (0,355 + 1,47) + 27,14 (0,673 + 27,14)} = \\ &= \arctg 0,01 \text{ рад} = |34'| < 1^\circ]. \end{aligned}$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода:
по (8.226)

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ст.осн}} + 3 I_{\mu}^2 r_1}{3 U_1} = \frac{276,4 + 3 \cdot 7,91^2 \cdot 0,355}{3 \cdot 220} = 0,52 \text{ А};$$

по (8.227)

$$a' = c_1^2 = 1,025^2 = 1,051; \quad b' = 0;$$

$$a = c_1 r_1 = 1,025 \cdot 0,355 = 0,364 \text{ Ом};$$

$$b = c_1 (x_1 + c_1 x_2') = 1,025 (0,673 + 1,025 \cdot 0,912) = 1,648 \text{ Ом}.$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения,

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 369,5 + 117 = 487 \approx 0,49 \text{ кВт}.$$

56. Рассчитываем рабочие характеристики для скольжений $s = 0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03$, принимая предварительно, что $s_{\text{ном}} \approx r_{2*}' = 0,025$. Результаты расчета сведены в табл. 8.34. После построения рабочих характеристик (рис. 8.77) уточняем значение номинального скольжения: $s_{\text{ном}} = 0,024$.

Номинальные данные спроектированного двигателя:

$$P_{2\text{ном}} = 15 \text{ кВт}, \quad U_{1\text{ном}} = 220/380 \text{ В}, \quad I_{1\text{ном}} = 28,4 \text{ А},$$

$$\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,894, \quad \eta_{\text{ном}} = 0,892.$$

Таблица 8.34. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

$P_{2\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$; $U_1 = 220/380 \text{ В}$; $2p = 4$; $I_{0a} = 0,52 \text{ А}$;

$I_{0p} = I_{\mu} = 7,91 \text{ А}$; $P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 0,49 \text{ кВт}$;

$r_1' = 0,355 \text{ Ом}$; $r_2' = 0,186 \text{ Ом}$; $c_1 = 1,025$;

$a' = 1,051$; $a = 0,364 \text{ Ом}$; $b' = 0$; $b = 1,65 \text{ Ом}$

№ п/п.	Расчетные формулы	Раз- мер- ность	Скольжение s						
			0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	$s_{\text{ном}} = 0,024$
1	$a' r_2' / s'$	Ом	39,1	19,55	13,03	9,77	7,82	6,52	8,15
2	$R = a + a' r_2' / s$	Ом	39,46	19,91	13,39	10,13	8,81	6,88	8,51
3	$X = b + b' r_2' / s$	Ом	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	39,49	19,98	13,49	10,26	8,34	7,08	8,67
5	$I_2'' = U_1 / Z$	А	5,57	11,011	16,31	21,44	26,38	31,07	25,37
6	$\cos \varphi_2' = R / Z$	—	0,999	0,996	0,993	0,987	0,981	0,972	0,982
7	$\sin \varphi_2' = X / Z$	—	0,042	0,083	0,122	0,161	0,198	0,233	0,19
8	$I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cos \varphi_2'$	А	6,08	11,49	16,72	21,68	26,4	30,72	25,43
9	$I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \sin \varphi_2'$	А	8,14	8,82	9,9	11,36	13,13	15,15	12,73
10	$I_{1.} = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	10,16	14,48	19,43	24,28	29,48	34,25	28,44
11	$I_2' = c_1 I_2''$	А	5,71	11,29	16,72	21,98	27,04	31,85	26
12	$P_1 = 3 U_1 I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	4,01	7,58	11,03	14,31	17,42	20,28	16,78
13	$P_{\Sigma 1} = 3 I_1'^2 r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,11	0,223	0,402	0,638	0,926	1,25	0,861
14	$P_{\Sigma 2} = 3 I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,018	0,071	0,156	0,27	0,408	0,566	0,377
15	$P_{\text{доб}} = 0,005 P_1$	кВт	0,034	0,048	0,064	0,081	0,097	0,113	0,084
16	$\Sigma P = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_{\text{доб}}$	кВт	0,652	0,832	1,112	1,479	1,921	2,418	1,812
17	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт	3,36	6,75	9,92	12,83	15,5	17,86	14,97
18	$\eta = 1 - \Sigma P / P_1$	—	0,838	0,891	0,899	0,897	0,89	0,881	0,892
19	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	—	0,598	0,794	0,861	0,886	0,896	0,897	0,894

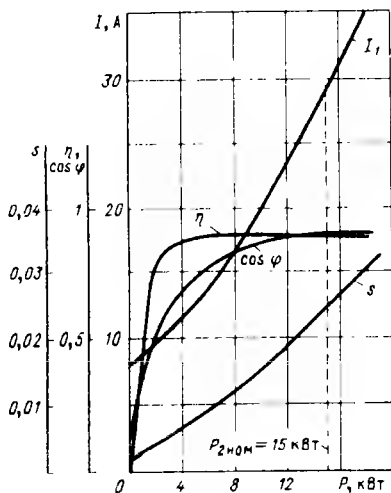


Рис. 8.77. Рабочие характеристики спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором ($P_{2\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$, $2p = 4$, $U_{\text{ном}} = 220/380 \text{ В}$, $I_{1\text{ном}} = 28,4 \text{ А}$, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,894$; $\eta_{\text{ном}} = 0,892$, $s_{\text{ном}} = 0,024$)

Расчет пусковых характеристик

а) Расчет токов с учетом влияния изменения параметров под влиянием эффекта вытеснения тока (без учета влияния насыщения от полей рассеяния)

Расчет проводится по формулам табл. 8.30 в целях определения токов в пусковых режимах для дальнейшего учета влияния насыщения на пусковые характеристики двигателя. При отсутствии необходимости учитывать влияние насыщения от полей рассеяния расчет пусковых характеристик проводится аналогично, включая последние пункты формуляра (см. табл. 8.30). Подробный расчет приведен для $s = 1$. Данные расчета остальных точек сведены в табл. 8.35.

57. Активное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока [$\nu_{\text{расч}} = 115^\circ \text{С}$, $\rho_{115} = 10^{-6}/20,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $b_c/b_{\text{п}} = 1$; $f_1 = 50 \text{ Гц}$]. по рис. 8.76 $h_c = h_{\text{п}} - (h_{\text{ш}} + h_{\text{ш}}^*) = 29,5 - (0,7 + 0,3) = 28,5 \text{ мм}$;

$$\xi = 2\pi h_c \sqrt{\frac{b_c}{b_{\text{п}}} \frac{f_2}{\rho_{\nu}}} 10^{-7} = 63,61 h_c \sqrt{s} = 63,61 \cdot 0,0285 = 1,81;$$

по рис. 8.57 для $\xi = 1,81$ находим $\varphi = 0,66$;
по (8.246)

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = \frac{0,0285}{1 + 0,66} = 0,0172 \text{ м} = 17,2 \text{ мм};$$

по (8.253), так как $(0,5 \cdot 7,9) < 17,2 < (22,4 + 0,5 \cdot 7,9)$ (см. рис. 8.76)

$$\begin{aligned} q_r &= \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_{\text{ш}}}{2} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = \\ &= \frac{\pi \cdot 7,9^2}{8} + \frac{7,9 + 5,71}{2} (17,2 - 0,5 \cdot 7,9) = 114,7 \text{ мм}^2. \end{aligned}$$

Таблица 8.35. Расчет токов в пусковом режиме
асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором
с учетом влияния эффекта вытеснения тока

$P_{2\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$; $U_1 = 220/380 \text{ В}$; $2p = 4$; $I_{1\text{ном}} = 28,4 \text{ А}$; $I'_{2\text{ном}} = 26 \text{ А}$;
 $x_1 = 0,673 \text{ Ом}$; $x'_2 = 0,912 \text{ Ом}$; $r_1 = 0,355 \text{ Ом}$; $r'_2 = 0,186 \text{ Ом}$;
 $x_{12\text{п}} = 39,62 \text{ Ом}$; $c_{1\text{п}} = 1,017$; $S_{\text{ном}} = 0,024$

№ п/п.	Расчетная формула	Размер- ность	Скольжение					
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	$s_{\text{кр}} = 0,14$
1	$\xi = 63,61 h_c \sqrt{s}$	—	1,81	1,63	1,28	0,81	0,57	—
2	$\varphi(\xi)$	—	0,66	0,45	0,19	0,04	0,01	—
3	$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi}$	мм	17,2	19,7	23,9	28,5	28,5	28,5
4	$k_r = q_c / q_r$	—	1,46	1,3	1,12	1	1	1
5	$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} (k_r - 1)$	—	1,32	1,21	1,08	1	1	1
6	$r'_{2\xi} = K_R r'_2$	Ом	0,246	0,225	0,2	0,186	0,186	0,186
7	$k_d = \varphi'(\xi)$	—	0,81	0,86	0,93	0,97	0,99	0,98
8	$\lambda_{\text{п}2\xi} = \lambda_{\text{п}2} - \Delta\lambda_{\text{п}2\xi}$	—	2,33	2,4	2,49	2,54	2,57	2,55
9	$K_x = \Sigma\lambda_{2\xi} / \Sigma\lambda_2$	—	0,95	0,97	0,98	0,99	1	1
10	$x'_{2\xi} = K_x x'_2$	Ом	0,866	0,885	0,894	0,903	0,912	0,908
11	$R_{\text{п}} = r_1 + c_{1\text{п}} \frac{r'_{2\xi}}{s}$	Ом	0,605	0,641	0,762	1,3	2,25	1,7
12	$X_{\text{п}} = x_1 + c_{1\text{п}} x'_{2\xi}$	Ом	1,55	1,57	1,58	1,59	1,6	1,6
13	$I'_2 = U_1 / \sqrt{R_{\text{п}}^2 + X_{\text{п}}^2}$	А	132,2	129,7	125,4	107,1	79,7	94,2
14	$I_1 = I'_2 \sqrt{R_{\text{п}}^2 + (X_{\text{п}} + x_{12\text{п}})^2} / (c_{1\text{п}} x_{12\text{п}})$	А	135,1	132,6	128,2	109,6	81,7	96,8

где

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) =$$

$$= 7,9 - \frac{7,9 - 4,2}{22,4} (17,2 - 0,5 \cdot 7,9) = 5,71 \text{ мм};$$

по (8.247)

$$k_r = q_c/q_r = 167/114,7 = 1,46$$

(q_c — по п. 33 расчета);

по (8.257)

$$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} (k_r - 1) = 1 + \frac{40,89 \cdot 10^{-6} (1,46 - 1)}{59,37 \cdot 10^{-6}} = 1,32$$

(по п. 45 расчета $r'_c = r_c = 40,89 \cdot 10^{-6}$ Ом; $r_2 = 59,37 \cdot 10^{-6}$ Ом). Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока

$$r'_{2\xi} = K_R r'_2 = 1,32 \cdot 0,186 = 0,246 \text{ Ом}.$$

58. Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока по рис. 8.58 для $\xi = 1,81$ (см. п. 57 расчета) $\varphi' = k_d = 0,81$; по табл. 8.25, рис. 8.52, а, ж (см. также п. 47 расчета) и по (8.262)

$$K_x = \frac{\lambda_{\pi 2\xi} + \lambda_{\pi 2} + \lambda_{d2}}{\lambda_{\pi 2} + \lambda_{\pi 2} + \lambda_{d2}} = \frac{2,33 + 0,59 + 2,09}{2,58 + 0,59 + 2,09} = 0,95,$$

где

$$[\text{по п. 47 расчета } \lambda_{\pi 2\xi} = \lambda_{\pi 2} - \Delta\lambda_{\pi 2\xi} = 2,58 - 0,25 = 2,33,$$

$$\Delta\lambda_{\pi 2\xi} = \lambda'_{\pi 2} (1 - k_d) = \left[\frac{h_0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + \right.$$

$$+ 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b_1} \left. \right] (1 - k_d) = \left[\frac{24,08}{3 \cdot 7,9} \left(1 - \frac{7,9^2}{8 \cdot 167} \right)^2 + \right.$$

$$+ 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 7,9} \left. \right] (1 - 0,81) = 0,25;$$

по (8.261) — см. также п. 47 расчета

$$x'_{2\xi} = x'_2 K_x = 0,912 \cdot 0,95 = 0,866 \text{ Ом}.$$

59. Пусковые параметры по (8.277) и (8.278)

$$x_{12п} = k_{\mu} x_{12} = 1,46 \cdot 27,14 = 39,62 \text{ Ом};$$

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} = 1 + \frac{0,673}{39,62} = 1,017.$$

60. Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока:
по (8.280) для $s = 1$

$$R_{п} = r_1 + c_{1п} r'_{2\xi}/s = 0,355 + 1,017 \cdot 0,246 = 0,605 \text{ Ом};$$

$$X_{п} = x_1 + c_{1п} x'_{2\xi} = 0,673 + 1,017 \cdot 0,866 = 1,55 \text{ Ом};$$

по (8.281)

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,605^2 + 1,55^2}} = 132,2 \text{ А};$$

по (8.283)

$$I_1 = I'_2 \frac{\sqrt{R_{п}^2 + (X_{п} + x_{12п})^2}}{c_{1п} x_{12п}} =$$

$$= 132,2 \frac{\sqrt{0,605^2 + (1,55 + 39,62)^2}}{1,017 \cdot 39,62} = 135,1 \text{ А}.$$

Расчет пусковых характеристик с учетом влияния вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

Расчет проводим для точек характеристик, соответствующих $s = 1; 0,8; 0,5$; 1, при этом используем значения токов и сопротивлений для тех же скольжений с учетом влияния вытеснения тока (см. табл. 8.35).

Данные расчета сведены в табл. 8.36. Подробный расчет приведен для $s = 1$.

61. Индуктивные сопротивления обмоток. Принимаем $k_{нас} = 1,35$:

по (8.263)

$$F_{п.ср} = 0,7 \frac{I_1 k_{нас} u_{п1}}{a} \left(k'_{\beta} + k_{y1} k_{об1} \frac{Z_1}{Z_2} \right) =$$

$$= 0,7 \frac{135,1 \cdot 1,35 \cdot 13}{1} \left(1 + 0,958 \frac{48}{38} \right) = 3668 \text{ А};$$

по (8.265)

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{I_{Z1} + I_{Z2}}} = 0,64 + 2,5 \times$$

$$\times \sqrt{\frac{0,5}{12,1 + 15,2}} = 0,978;$$

Таблица 8.36. Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

$$P_{2\text{ном}} = 15 \text{ кВт}; U_1 = 220/380 \text{ В}; 2p = 4; I_{1\text{ном}} = 28,4 \text{ А}; I'_{2\text{ном}} = 26 \text{ А};$$

$$x_1 = 0,67 \text{ Ом}; x'_2 = 0,912 \text{ Ом}; x_{12\text{п}} = 39,62 \text{ Ом}; r_1 = 0,355 \text{ Ом};$$

$$r'_2 = 0,186 \text{ Ом}; s_{\text{ном}} = 0,024; C_N = 0,978$$

№ п/п.	Расчетные формулы	Раз- мер- ность	Скольжение s					
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	$s_{\text{кр}} =$ $= 0,14$
1	$k_{\text{нас}}$	-	1,35	1,3	1,2	1,1	1,05	1,08
2	$F_{\text{п.ср}} = 0,7 \frac{I_1 k_{\text{нас}} u_{\text{п}}}{a} \left(k'_{\beta} + k_{y1} k_{\text{об1}} \frac{Z_1}{Z_2} \right)$	А	3668	3467	3094	2422	1725	2102
3	$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}} \cdot 10^{-6}}{1,6\delta C_N}$	Тл	4,69	4,43	3,95	3,1	2,21	2,69
4	$\kappa_{\delta} = f(B_{\Phi\delta})$		0,5	0,53	0,61	0,72	0,84	0,79
5	$c_{\Sigma 1} = (t_{Z1} - b_{\text{ш1}})(1 - \kappa_{\delta})$	мм	4,2	3,95	3,28	2,35	1,34	1,76
6	$\lambda_{\text{п1нас}} = \lambda_{\text{п1}} - \Delta\lambda_{\text{п1нас}}$	-	1,17	1,18	1,2	1,25	1,31	1,28
7	$\lambda_{\text{д1нас}} = \kappa_{\delta} \lambda_{\text{д1}}$	-	0,87	0,92	1,06	1,25	1,46	1,37
8	$x_{1\text{нас}} = x_1 \Sigma \lambda_{1\text{нас}} / \Sigma \lambda_1$	Ом	0,505	0,514	0,538	0,574	0,615	0,597
9	$c_{1\text{п.нас}} = 1 + x_{1\text{нас}} / x_{12\text{п}}$	-	1,013	1,013	1,014	1,014	1,016	1,015
10	$c_{\Sigma 2} = (t_{Z2} - b_{\text{ш2}})(1 - \kappa_{\delta})$	мм	6,85	6,44	5,34	3,84	2,19	2,88
11	$\lambda_{\text{п2}\xi\text{нас}} = \lambda_{\text{п2}\xi} - \Delta\lambda_{\text{п2нас}}$	-	1,78	1,86	1,96	2,06	2,17	2,11
12	$\lambda_{\text{д2нас}} = \kappa_{\delta} \lambda_{\text{д2}}$	-	1,05	1,11	1,27	1,5	1,76	1,65
13	$x'_{2\xi\text{нас}} = x'_2 \Sigma \lambda_{2\xi\text{нас}} / \Sigma \lambda_2$	Ом	0,593	0,617	0,662	0,72	0,787	0,754
14	$R_{\text{п.нас}} = r_1 + c_{1\text{п.нас}} r'_{2\xi} / s$	Ом	0,6	0,64	0,76	1,3	2,24	1,7
15	$X_{\text{п.нас}} = x_{1\text{нас}} + c_{1\text{п.нас}} x'_{2\xi\text{нас}}$	Ом	1,11	1,14	1,21	1,3	1,41	1,36
16	$I'_{2\text{нас}} = U_1 / \sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + X_{\text{п.нас}}^2}$	А	174,4	168,3	153,9	119,7	83,1	101,1

№ п/п.	Расчетные формулы	Раз- мер- ность	Скольжение s					
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	$s_{кр} = 0,14$
17	$I_{1нас} = I'_{2нас} \times \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} \times x_{12п}}$	А	177	170,9	156,4	122	84,6	103,1
18	$k'_{нас} = I_{1нас}/I_1$ (сравнить с принятым в п. 1 $k_{нас}$)	—	1,31	1,29	1,22	1,11	1,04	1,07
19	$I_{1*} = I_{1нас}/I_{1ном}$	—	6,2	6	5,5	4,3	3	3,6
20	$M_* = \left(\frac{I'_{2нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 K_R \frac{s_{ном}}{s}$	—	1,43	1,52	1,82	2,54	2,45	2,59

по (8.264)

$$B_{Ф\delta} = \frac{F_{п.ср} \cdot 10^{-6}}{1,6\delta C_N} = \frac{3668 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,978} = 4,69 \text{ Тл.}$$

По рис. 8.61 для $B_{Ф\delta} = 4,69$ Тл находим $\kappa_{\delta} = 0,5$.Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения:
по (8.266)

$$c_{\Sigma 1} = (r_{Z1} - b_{ш1})(1 - \kappa_{\delta}) = (12,1 - 3,7)(1 - 0,5) = 4,2;$$

по (8.269)

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_{ш1} + 0,58h_k}{b_{ш1}} \frac{c_{\Sigma 1}}{c_{\Sigma 1} + 1,5b_{ш1}} =$$

$$= \frac{1 + 0,58 \cdot 1,95}{4,7} \frac{4,2}{4,2 + 1,5 \cdot 3,7} = 0,25$$

$$[h_k = \frac{b_1 - b_{ш}}{2} = \frac{7,6 - 3,7}{2} = 1,95 \text{ мм (см. рис. 8.76)}];$$

по (8.272)

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас} = 1,42 - 0,25 = 1,18.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения по (8.274)

$$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} \kappa_{\delta} = 1,74 \cdot 0,5 = 0,87.$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом влияния насыщения по (8.275)

$$x_{1нас} = x_1 \frac{\Sigma \lambda_{1нас}}{\Sigma \lambda_1} = 0,673 \frac{1,18 + 1,34 + 0,87}{1,42 + 1,34 + 1,74} = 0,505 \text{ Ом.}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учетом влияния насыщения и вытеснения тока:
по (8.271) (см. п. 47 и 58 расчета)

$$\Delta \lambda_{п2нас} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \frac{c_{э2}}{c_{э2} + b_{ш2}} = \frac{1}{1,5} \frac{6,85}{6,85 + 1,5} = 0,55,$$

где по (8.270)

$$c_{э2} = (r_{Z2} - b_{ш2}) (1 - \kappa_{\delta}) = (15,2 - 1,5) (1 - 0,5) = 6,85$$

(для закрытых пазов ротора $h_{ш2} = h_{ш}^I + h_{ш} = 0,3 + 0,7 = 1 \text{ мм}$);
по (8.273)

$$\lambda_{п2\xi нас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta \lambda_{п2нас} = 2,33 - 0,55 = 1,78.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом влияния насыщения по (8.274)

$$\lambda_{д2нас} = \lambda_{д2} \kappa_{\delta} = 2,09 \cdot 0,5 = 1,05.$$

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения по (8.276)

$$x'_{2\xi нас} = x'_2 \frac{\Sigma \lambda_{2\xi нас}}{\Sigma \lambda_2} = 0,912 \frac{1,78 + 1,05 + 0,59}{2,58 + 2,09 + 0,59} = 0,593 \text{ Ом;}$$

по (8.278)

$$c_{1п.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12п}} = 1 + \frac{0,505}{39,62} = 1,013.$$

62. Расчет токов и моментов:
по (8.280)

$$R_{п.нас} = r_1 + c_{1п.нас} \frac{r'_{2\xi}}{s} = 0,355 + 1,013 \cdot 0,246 = 0,604 \text{ Ом;}$$

$$X_{п.нас} = X_{1нас} + c_{1п.нас} x'_{2\xi нас} = 0,505 + 1,013 \cdot 0,593 = 1,11 \text{ Ом;}$$

по (8.281)

$$I'_{2\text{нас}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + X_{\text{п.нас}}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,604^2 + 1,11^2}} = 174,1 \text{ A};$$

по (8.283)

$$I_{1\text{нас}} = I'_{2\text{нас}} \frac{\sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + (X_{\text{п.нас}} + x_{12\text{п}})^2}}{c_{1\text{п.нас}} x_{12\text{п}}} =$$

$$= 174,1 \frac{\sqrt{0,604^2 + (1,11 + 39,62)^2}}{1,013 \cdot 39,62} = 176,7 \text{ A}.$$

Кратность пускового тока с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения

$$I_{\text{п*}} = \frac{I_{1\text{п.нас}}}{I_{1\text{ном}}} = \frac{176,7}{28,4} = 6,2.$$

Кратность пускового момента с учетом влияния вытеснения тока и насыщения по (8.284)

$$M_{\text{п*}} = \left(\frac{I'_{2\text{п.нас}}}{I'_{2\text{ном}}} \right)^2 K_R \frac{s_{\text{ном}}}{s} = \left(\frac{174,4}{26} \right)^2 1,32 \cdot 0,24 = 1,43.$$

Полученный в расчете коэффициент насыщения

$$k'_{\text{нас}} = \frac{I_{1\text{п.нас}}}{I_{1\text{п}}} = \frac{177}{135,1} = 1,31$$

отличается от принятого $k_{\text{нас}} = 1,35$ менее чем на 3 %.

Для расчета других точек характеристики задаемся $k_{\text{нас}}$, уменьшенным в зависимости от тока I_1 (см. табл. 8.35);
принимая при

$$s = 0,8 \quad k_{\text{нас}} = 1,3;$$

$$s = 0,5 \quad k_{\text{нас}} = 1,2;$$

$$s = 0,2 \quad k_{\text{нас}} = 1,1;$$

$$s = 0,1 \quad k_{\text{нас}} = 1,05.$$

Данные расчета сведены в табл. 8.36, а пусковые характеристики представлены на рис. 8.78.

63. Критическое скольжение определяем после расчета всех точек пусковых характеристик (табл. 8.36) по средним значениям сопротивлений $X_{1\text{нас}}$ и $X'_{2\text{нас}}$, соответствующим скольжениям $s = 0,2 \div 0,1$:

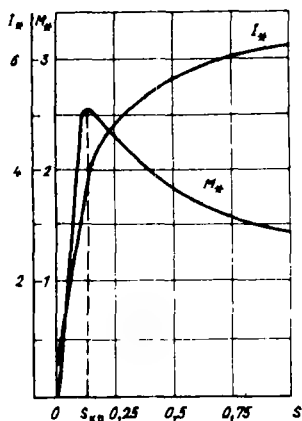


Рис. 8.78. Пусковые характеристики спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором ($P_{2\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$, $2p = 4$, $U_{\text{ном}} = 220/380 \text{ В}$; $M_{п*} = 1,43$, $I_{п*} = 6,2$, $M_{\text{max}} = 2,59$)

по (8.286)

$$s_{\text{кр}} = \frac{r'_{2\xi}}{x_{1\text{нас}}/c_{1\text{п.нас}} + x'_{2\xi\text{нас}}} = \frac{0,186}{0,59/1,015 + 0,713} = 0,14,$$

после чего рассчитываем кратность максимального момента: $M_{* \text{max}} = 2,59$ (см. табл. 8.36).

Спроектированный асинхронный двигатель удовлетворяет требованиям ГОСТ как по энергетическим показателям (КПД и $\cos \varphi$), так и по пусковым характеристикам.

Тепловой расчет

64. Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя по (8.330)

$$\Delta \nu_{\text{пов1}} = K \frac{P'_{\text{эл1}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi D l_1 \alpha_1} = 0,2 \frac{348 + 276}{0,185 \cdot 0,14 \cdot 108} = 44,62^\circ \text{C}$$

[по табл. 8.33 $K = 0,2$; по (8.328) $P'_{\text{эл1}} = k_{\rho} P_{\text{эл}} \frac{2l_1}{l'_{\text{ср.1}}} = 1,07 \cdot 861 \cdot 2 \cdot 0,14 / 0,742 = 348 \text{ Вт}$, где из табл. 8.34 для $s = s_{\text{ном}}$ находим $P_{\text{эл}} = 861 \text{ Вт}$; по рис. 8.70, $\alpha_1 = 108 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ \text{C}$; $k_{\rho} = 1,07$].

65. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора по (8.331)

$$\Delta \nu_{\text{из.п1}} = \frac{P'_{\text{эл.п1}}}{Z_1 \Pi_{\text{п1}} l_1} \left(\frac{b_{\text{из.п1}}}{\lambda_{\text{эжв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \lambda'_{\text{эжв}}} \right) = \frac{348}{48 \cdot 0,054 \cdot 0,14} \left(\frac{0,4}{0,16} + \frac{7,6 + 10}{16 \cdot 1,4} \right) \cdot 10^{-3} = 3,15^\circ \text{C}$$

[по (8.332) $\Pi_{\text{п1}} = 2h_{\text{пк}} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 18,3 + 10 + 7,6 = 54,2 \text{ мм} = 0,054 \text{ м}$; для изоляции класса нагревостойкости I: $\lambda_{\text{эжв}} = 0,16 \text{ Вт/м}^2$, по рис. 8.72 для $d/d_{\text{из}} = 1,5/1,585 = 0,95$ находим $\lambda'_{\text{эжв}} = 1,4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ \text{C)}$].

66. Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей по (8.335)

$$\Delta v_{из.л1} = \frac{P'_{эл1}}{2Z_1 \pi l_{л1} l_{л1}} \left(\frac{b_{из.л1}}{\lambda_{эКВ}} + \frac{h_{п1}}{12\lambda'_{эКВ}} \right) =$$

$$= \frac{574}{2 \cdot 48 \cdot 0,054 \cdot 0,23} \left(\frac{0,05}{0,16} + \frac{18,3}{12 \cdot 1,4} \right) \cdot 10^{-3} = 0,67^\circ \text{C}$$

[по (8.329)]

$$P'_{эл1} = k_\rho P_{эл} \frac{2l_{л1}}{l_{ср1}} = 1,07 \cdot 861 \frac{2 \cdot 0,231}{0,742} = 574 \text{ Вт};$$

$$l_{л1} = l_{п1} = 0,100 \text{ м}; b_{из.л1 \max} = 0,05 \text{ мм}.$$

67. Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя по (8.336)

$$\Delta v_{пов.л1} = \frac{K P'_{эл1}}{2\pi D l_{вып1} \alpha_1} = \frac{0,2 \cdot 574}{2\pi \cdot 0,185 \cdot 74,8 \cdot 10^{-3} \cdot 108} = 12,23^\circ \text{C}.$$

68. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя по (8.337)

$$\Delta v'_1 = \frac{(\Delta v_{пов1} + \Delta v_{из.п1}) 2l_1 + (\Delta v_{из.л1} + \Delta v_{пов.л1}) 2l_{л1}}{l_{ср1}} =$$

$$= \frac{(44,62 + 3,15) \cdot 2 \cdot 0,14 + (0,67 + 12,23) \cdot 2 \cdot 0,23}{0,742} = 26,02^\circ \text{C}.$$

69. Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды по (8.338)

$$\Delta \gamma_{\text{в}} = \frac{\Sigma P'_{\text{в}}}{s_{\text{кор}} \alpha_{\text{в}}} = \frac{1293}{0,99 \cdot 20} = 65,3^\circ \text{C}$$

[по (8.342)]

$$\Sigma P'_{\text{н}} = \Sigma P' - (1 - K) (P'_{эл1} + P_{\text{ст.осн}}) - 0,9 P_{\text{мех}} =$$

$$= 1897 - (1 - 0,2) (348 + 276) - 0,9 \cdot 117 = 1293 \text{ Вт},$$

где по (8.340)

$$\Sigma P' = \Sigma P + (k_\rho - 1) (P_{эл1} + P_{эл2}) = 1812 + (1,07 - 1) (861 + 377) = 1897 \text{ Вт};$$

$\Sigma P = 1812 \text{ Вт}$ из табл. 8.34 для $s = s_{\text{ном}}$; по (8.343) $s_{\text{кор}} = (\pi D_{\text{а}} + 8 l_{\text{р}}) (l_1 + 2 l_{\text{вып1}}) = (\pi 0,272 + 8 \cdot 0,32) (0,14 + 2 \cdot 0,0748) = 0,99 \text{ м}^2$, где по рис. 8.73 $l_{\text{р}} = 0,32 \text{ м}$ для $h = 160 \text{ мм}$; по рис. 8.70, б $\alpha_{\text{н}} = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C})$ для $D_{\text{а}} = 0,272 \text{ м}$.

70. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды по (8.344)

$$\Delta \nu_1 = \Delta \nu'_1 + \Delta \nu_B = 26,02 + 65,3 = 91,32^\circ \text{C}.$$

71. Проверка условий охлаждения двигателя.

Требуемый для охлаждения расход воздуха по (8.356)

$$\theta_B = \frac{k_m \Sigma P'_B}{1100 \Delta \nu_B} = \frac{5,05 \cdot 1897}{1100 \cdot 65,3} = 0,13 \text{ м}^3/\text{с} \quad \text{где } 1897$$

[по (8.357)]

$$k_m = m' \sqrt{\frac{n}{100} D_a} = 2,5 \sqrt{\frac{1500}{100}} \cdot 0,272 = 5,05].$$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, по (8.358)

$$\theta'_B = 0,6 D_a^3 \frac{n}{100} = 0,6 \cdot 0,272^3 \frac{1500}{100} = 0,18 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Нагрев частей двигателя находится в допустимых пределах.

Вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

Вывод: спроектированный двигатель отвечает поставленным в техническом задании требованиям.

Для более детального расчета нагрева и вентиляции двигателя можно использовать методы уточненного теплового и вентиляционного расчетов, изложенные в гл. 7.

б) Расчет асинхронного двигателя с фазным ротором

Техническое задание

Спроектировать трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором: $P_2 = 132 \text{ кВт}$; $U = 380/660 \text{ В}$; $2p = 6$; конструктивное исполнение IM1001; исполнение по способу защиты IP23; способ охлаждения IC01; климатическое исполнение и категория размещения У3; класс нагревостойкости изоляции F.

Выбор главных размеров

1. По рис. 8.17, б принимаем $h = 315 \text{ мм}$; по табл. 8.6 находим для данной оси вращения $D_a = 590 \text{ мм} = 0,59 \text{ м}$.

2. По (8.2)

$$D = K_D D_a = 0,72 \cdot 0,59 = 0,425 \text{ м}$$

(по табл. 8.7 для $2p = 6$ находим $K_D = 0,72$).

3. По (8.4)

$$P' = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos \varphi} = 132 \frac{0,98}{0,92 \cdot 0,88} = 159,8 \text{ кВт} \cdot \text{А}$$

($k_E = 0,98$ – по рис. 8.26; $\eta = 0,92$; $\cos \varphi = 0,88$ – по рис. 8.21, в).

5. По (8.6)

$$l_{\delta} = \frac{P^1}{D^2 \Omega k_B k_{об1} AB_{\delta}} =$$

$$= \frac{159,8 \cdot 10^3}{0,425^2 \cdot 104,7 \cdot 1,11 \cdot 0,92 \cdot 51 \cdot 10^3 \cdot 0,84} = 0,193 \approx 0,19 \text{ м};$$

по (8.5)

$$\Omega = 2\pi \frac{f}{p} = 2\pi 50/3 = 104,7 \text{ рад/с};$$

по рис. 8.23, б $A = 51 \cdot 10^3 \text{ А/м}; B_{\delta} = 0,84 \text{ Тл};$ принимаем предварительно $k_{об1} = 0,92$.

6.

$$\lambda = l_{\delta}/\tau = 0,19/0,2225 = 0,85.$$

Окончательно принимаем

$$D_a = 0,59 \text{ м}; D = 0,425 \text{ м}; l_1 = l_{\delta} = 0,19 \text{ м}.$$

Расчет зубцовой зоны и обмотки статора

7. По (8.16)

$$Z_{1min} \div Z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{Z1max}} \div \frac{\pi D}{t_{Z1min}} =$$

$$= \frac{\pi 425}{22} \div \frac{\pi 425}{17} = 60,7 \div 78,5$$

(по табл. 8.9 зубцовое деление при прямоугольных полуоткрытых пазах статора $t_{Z1} = 17 \div 22 \text{ мм}$).

8. Принимаем

$$Z_1 = 72; q_1 = Z_1/(2pm) = 72/(6 \cdot 3) = 4;$$

$$t_{Z1} = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi 0,425}{72} = 18,54 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 18,54 \text{ мм}.$$

9. По (8.17)

$$u_{II}' = \frac{\pi D A}{I_{1ном} Z_1} = \frac{\pi 0,425 \cdot 51 \cdot 10^3}{143 \cdot 72} = 6,61$$

{по (8.18)}

$$I_{1ном} = \frac{P_2}{m U_{1ном} \eta \cos \varphi} = \frac{132\,000}{3 \cdot 380 \cdot 0,92 \cdot 0,88} = 143 \text{ А};$$

по (8.19)

$$u_{\Pi} = a u_{\Pi}^I = 3 \cdot 6,61 = 19,83.$$

Принимаем $a = 3$; $u_{\Pi} = 20$.

10. По (8.20)

$$w_1 = \frac{u_{\Pi} Z_1}{2 a m} = \frac{20 \cdot 72}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 80.$$

11. По (8.21)

$$A = \frac{2 I_{\text{ном}} w_1 m}{\pi D} = \frac{2 \cdot 143 \cdot 80 \cdot 3}{\pi \cdot 0,425} = 51,41 \cdot 10^3 \text{ А/м.}$$

$$12. k_{об1} = k_{p1} k_{y1} = 0,958 \cdot 0,966 = 0,925$$

[по табл. 3.16 для $q = 4$ $k_{p1} = 0,958$; по (3.14)

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \beta\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} 0,833\right) = 0,966,$$

где $\beta = y/\tau = 10/12 = 0,833$; $\tau = Z_1/2p = 72/6 = 12$].

13. По (8.22)

$$\Phi = \frac{k_E U_{\text{ном}}}{4 k_B w_1 k_{об1} f_1} = \frac{0,98 \cdot 380}{4 \cdot 1,11 \cdot 80 \cdot 0,925 \cdot 50} = 22,67 \cdot 10^{-3} \text{ Вб,}$$

где $k_E = 0,98$ - по рис. 8.20.

14. По (8.23)

$$B_{\delta} = \frac{p \Phi}{D l_{\delta}} = \frac{3 \cdot 22,67 \cdot 10^{-3}}{0,425 \cdot 0,19} = 0,842 \text{ Тл.}$$

15. По (8.24)

$$q_{\text{эф1}} = \frac{I_{\text{ном}}}{a J_1} = \frac{143}{3 \cdot 5,06 \cdot 10^6} = 9,42 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 9,42 \text{ мм}^2$$

$$[J_1 = \frac{(A J_1)}{A} = \frac{260 \cdot 10^9}{51,4 \cdot 10^3} = 5,06 \text{ А/м}^2,$$

где по рис. 8.27, $\delta (A J_1) = 260 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^3$].

Обмотку выполняем из подразделенных катушек; провод прямоугольный; $n_{\text{эл}} = 2$. Предварительно

$$q_{\text{эл}} = q_{\text{эф1}}/n_{\text{эл}} = 9,42/2 = 4,71 \text{ мм}^2.$$

16. По (8.29)

$$b_{Z, \min} = \frac{B_{\delta} r_{Z1} l_{\delta}}{B_{\text{ст1 max}} l_{\text{ст1}} k_{\text{ст1}}} =$$

$$= \frac{0,842 \cdot 18,54 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19}{1,9 \cdot 0,19 \cdot 0,95} = 8,65 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 8,65 \text{ мм}$$

(по табл. 8.10 $B_{Z \max} = 1,9 \text{ Тл}$; по табл. 8.11 $k_{c1} = 0,95$).

17. Предварительно

$$b_{\Pi} = t_{Z1} - b_{Z1 \min} = 18,54 - 8,65 = 9,89 \text{ мм};$$

по (8.35)

$$b'_{\text{эл}} = 0,5 (b_{\Pi} - \Delta'_{\text{из}}) = 0,5 (b_{\Pi} - 2b_{\text{из}} - \Delta b_{\Pi}) =$$

$$= 0,5 (9,89 - 2 \cdot 1,1 - 0,3) = 3,7 \text{ мм}$$

(по табл. 3.9 $b_{\text{из}} = 1,1 \text{ мм}$; по табл. 8.12 $\Delta b_{\Pi} = 0,3 \text{ мм}$).

$$18. \text{ По табл. П3.2 выбираем провод ПЭТП-155 } \frac{1,4 \times 3,55}{1,52 \times 3,67}; q_{\text{эл}} = 4,755 \text{ мм}^2;$$

$$q_{\text{эф1}} = q_{\text{эл}} n_{\text{эл}} = 4,755 \cdot 2 = 9,51 \text{ мм}^2,$$

19. Ориентируясь на табл. 3.9, составляем таблицу заполнения паза статора (табл. 8.37). Размеры паза в штампе (см. рис. 8.79, а) принимаем с учетом припусков Δb_{Π} и Δh_{Π} по (8.36).

20. По (8.27) уточняем

$$J_1 = \frac{I_{\text{ном}}}{a q_{\text{эф}}} = \frac{143}{3 \cdot 9,51 \cdot 10^{-6}} = 5,01 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

21. По рис. 8.31 $\delta = 0,9 \text{ мм}$.

$$22. D_2 = D - 2\delta = 0,425 - 2 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} = 0,4232 \text{ м}.$$

23. Принимаем $l_2 = l_1 = 0,19 \text{ м}$.

$$24. \text{ Обмотку ротора выполняем стержневой волновой с } q_2 = 4 \frac{1}{2}, \text{ тогда } Z_2 =$$

$$= 2p_2 m_2 q_2 = 2 \cdot 3 \cdot 4,5 = 81.$$

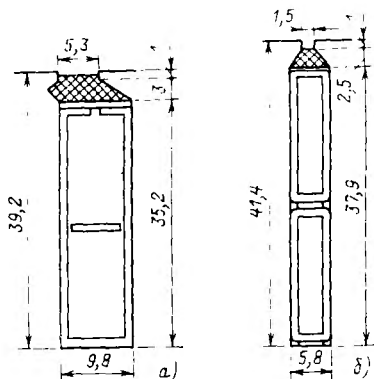
25.

$$t_{Z_2} = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0,4232}{81} = 16,41 \cdot 10^{-3} = 16,41 \text{ мм}.$$

Таблица 8.37. Заполнение паза статора

Наименование	Размер, мм	
	по ширине паза	по высоте паза
Обмоточный провод изолированный $1,52 \times 3,67$	$3,67 \times 2 = 7,34$	$1,52 \times 20 = 30,4$
Пазовая изоляция и допуск на укладку	2,2	4,5
Всего на паз без клина	9,54	34,9

Рис. 8.79. Пазы спроектированного двигателя с фазным ротором ($P_2 = 132$ кВт, $2p = 6$, $U_{\text{ном}} = 380/660$ В)



26. По (8.55)

$$w_2 = 2p_2 q_2 = 6 \cdot 4,5 = 27.$$

27. Напряжение на контактных кольцах ротора при соединении обмотки ротора в звезду по (8.56)

$$U_{\text{к.к}} = \sqrt{3} U_{\text{ном}} \frac{w_2}{w_1} = 3 \cdot 380 \frac{27}{80} = 222,1 \approx 220 \text{ В}.$$

28. По (8.57)

$$I_2 = k_i I_1 \gamma_i = 0,904 \cdot 143 \cdot 2,87 = 371 \text{ А}$$

[по (8.58) $k_i = 0,2 + 0,8 \cos \varphi = 0,2 + 0,8 \cdot 0,88 = 0,904$];
по (8.59)

$$\nu_i = \frac{m_1 w_1 k_{\text{об1}}}{m_2 w_2 k_{\text{об2}}} = \frac{3 \cdot 80 \cdot 0,925}{3 \cdot 27 \cdot 0,955} = 2,87,$$

где по (3.20)

$$k_{\text{об2}} = k_{p2} = \frac{0,5}{N \sin \left(\frac{\pi}{2mN} \right)} = \frac{0,5}{9 \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 9} \right)} = 0,955$$

при $q = 4 \frac{1}{2}$; $N = 2 \cdot 4 + 1 = 9$ (см. пп. 3).

29. По (8.60)

$$q_{\text{эф2}} = I_2 / J_2 = 371 / (5,7 \cdot 10^6) = 65,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 65,1 \text{ мм}^2,$$

принимая $J_2 = 5,7 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

30. Предварительно $b_{\text{п2}} = 0,35 t_{Z2} = 0,35 \cdot 16,41 = 5,74 \text{ мм}$, $b_{\text{эл2}} = b_{\text{п2}} - 2b_{\text{из}} - \Delta b_{\text{п}} = 5,74 - 1,7 - 0,3 = 3,74 \text{ мм}$ [$2b_{\text{из}} = 1,7 \text{ мм}$ по табл. 3.11, $\Delta b_{\text{п}} = 0,3 \text{ мм}$ по табл. 8.12]. По табл. П3.2 выбираем неизолированный провод с $a \approx 3,8 \text{ мм}$, $b = 16,8 \text{ мм}$, $q_{\text{эф2}} = 63,36 \text{ мм}^2$.

31. Уточняем J_2 :

$$J_2 = I_2 / q_{\text{эф2}} = 371 / 63,36 \cdot 10^{-6} = 5,86 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

отсутствуют страницы

439 – 464